

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

Porovnání zkoušek těsnosti světlometů

Comparing tightness tests of headlight

Student:

Bc. Lukáš Krabica

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Kamil Fojtášek, Ph.D

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Lukáš Krabica

Studijní program:

N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

2302T043 Hydraulika a pneumatika

Téma:

Porovnání zkoušek těsnosti světlometů
Comparing Tightness Tests of Headlights

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

- 1) Vypracujte rešerši k problematice detekce netěsností a určení velikosti průtokových ztrát.
- 2) Na základě experimentu porovnejte vybrané metody měření netěsností z pohledu skladby zařízení, doby zkoušení, náročnosti zpracování výsledků, spolehlivosti apod.
- 3) Sestavte matematický model vybraných metod zkoušení, výsledky porovnejte s experimentem.
- 4) Navrhněte nejvhodnější metodu měření netěsností pro zkoušenou nádobu (světlomet) do objemu 3 litry, specifikujte prvky systému, sestavte popis a návod pro měření a vyhodnocení výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:

KOPÁČEK, J. *Pneumatické mechanismy Díl I. - Pneumatické prvky a systémy*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2005. 275 s. ISBN 80-248-0879-X.

KOLEKTIV AUTORŮ. *SMC Training - Stlačený vzduch a jeho využití*. Brno: SMC Industrial Automation CZ s.r.o. 2. vydání. 344 s.

BEATER, P. *Pneumatic Drives: System Design, Modeling and Control*. Berlín: Springer, 2007. 323 p. ISBN 978-3540-69470-0.

MURRENHOF, H., REINERTZ, O. *Fundamentals of Fluid Power Part 2: Pneumatics*. Aachen: Shaker Verlag, 2014. 333 p. ISBN 978-3-8440-3213-0.

Odborné příspěvky a internetové zdroje zabývající se danou problematikou.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Kamil Fojtášek, Ph.D.**

Datum zadání: 08.12.2017

Datum odevzdání: 21.05.2018

doc. Dr. Ing. Lumír Hružík
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 21. května 2018



.....

Podpis studenta

Prohlašuji, že:

jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),

beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou diplomovou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),

bude-li požadováno, jeden výtisk této diplomové práce bude uložen u vedoucího práce,

s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,

užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),

beru na vědomí, že - podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato diplomová práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 21. května 2018



.....
Podpis autora práce

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Lukáš Krabica

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Rolnická 1787, Uherský Brod

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. KRABICA, L. Porovnání zkoušek těsnosti světlometů: Diplomová práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 2018, 61 s. Vedoucí práce: Ing. Kamil Fojtášek, Ph.D.

Diplomová práce se zabývá porovnáním zkoušek těsnosti automobilového světlometu. V úvodu jsou popsány různé druhy metod měření těsnosti uzavřeného objemu, nové technologie k měření těsnosti jejich citlivost a využití. Další částí práce je provedení samotného měření těsnosti dle zvolených experimentálních metod. Dále následuje vyhodnocení experimentálního měření a jeho následná matematická simulace v software Matlab. V závěru práce jsou poté všechny metody měření i matematických simulací porovnány.

Klíčová slova: Test těsnosti světlometu, Matematická simulace, Měření těsnosti,

ANNOTATION OF DIPLOMA THESIS

Bc. KRABICA, L. Comparing tightness tests of headlight: Diploma thesis. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Department of Hydromechanics and Hydraulic, 2018, 61 p. Thesis head: Ing. Kamil Fojtášek, Ph.D.

The theme of the diploma thesis is comparing tightness tests of headlight. Introduction deals with the basic methods of testing tightness of the closed volume chamber, new technologies of tightness testing and their, sensitivity and usage. Next part of the thesis is experimental measurement of the chosen tightness test methods. Next part is evaluation of the experimental measurement and its simulation in Matlab software. In the last chapter of this thesis is comparison of the experimental measurement and mathematical simulation.

Key words: Headlight leak test, Mathematical simulation, Leakage measurement

Obsah

Seznam použitých symbolů a značek.....	8
Úvod.....	10
1. Metody testování těsnosti.....	11
1.1 Bublinková metoda.....	12
1.2 Bublinková metoda (mýdlová)	13
1.3 Měření těsnosti dle ČSN 109006.....	14
1.4 Metoda poklesu tlaku v uzavřeném objemu	14
1.5 Metoda nárůstu tlaku v uzavřeném objemu.....	15
1.6 Průtokový test těsnosti	16
1.7 Metody testování těsnosti značkovacím plynem.....	17
1.8 Vakuová detekční komora (Zevnitř- ven).....	19
1.9 Vakuová detekční komora (Zvnějšku-dovnitř).....	20
1.10 Čichací a postřikovací test	20
1.11 Akumulační test těsnosti	21
1.12 Halogenová detekce netěsnosti.....	22
1.13 Detektor netěsností - hélium (Zvějšku-dovnitř).....	23
1.14 Detektor netěsností - hélium (Zevnitř- ven)	23
1.15 Postřik héliem (Zvnějšku - dovnitř).....	24
1.16 Testování netěsnosti héliem ve vakuové komoře (Zevnitř- ven).....	24
1.17 Vodíková metoda detekce (Zevnitř- ven)	26
2.0 Experimentální ověření měření těsnosti.....	26
2.1 Výběr zkušební metody.....	26

2.2 Měření unikajícího průtoku.....	27
2.3 Měření metody poklesu tlaku v uzavřeném objemu.....	30
2.4 Měření metody nárůstu tlaku v uzavřeném objemu.....	33
3. Specifikace použitých prvků měřících obvodů.....	36
4. Tvorba matematických modelů.....	38
4.1 Matematický model unikajícího průtoku.....	38
4.2 Matematický model poklesu tlaku v uzavřeném objemu.....	44
4.3 Matematický model nárůstu tlaku v uzavřeném objemu.....	46
5. Porovnání výsledků měření a matematického modelu	47
5.1 Porovnání výsledků unikajícího průtoku.....	48
5.2 Porovnání výsledků poklesu tlaku v uzavřeném objemu.....	49
5.3 Porovnání výsledků nárůstu tlaku v uzavřeném objemu.....	50
6. Porovnání zkoušek těsnosti.....	51
6.1 Porovnání zkoušek těsnosti – skladba zařízení.....	51
6.2 Porovnání zkoušek těsnosti – doba zkoušení.....	51
6.3 Porovnání zkoušek těsnosti – spolehlivost	52
7. Určení nejistot měření	54
7.1 Určení nejistot měření při měření tlaku.....	54
8. Závěr.....	56
Seznam použité literatury.....	58
Seznam příloh.....	61

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Název	Jednotka
u_a	Standardní nejistota typu A	[-]
u_B	Standardní nejistota typu B	[-]
u_C	Kombinovaná standardní nejistota	[-]
δ_1	Chyba měření rozsahu U_x	[-]
q_d	Největší únik vzduchu	$[cm^3/min]$
δ_2	Chyba měření rozsahu U_R	[-]
C_d	Koeficient vypouštění	[-]
k_r	koeficient rozšíření	[-]
n	Počet měření	[-]
p	Tlak	$[Pa]$
p_b	Tlak uvnitř bubliny	$[Pa]$
p_{He}	Parciální tlak hélia	$[Pa]$
p_i	Naměřený tlak	$[Pa]$
p_p	Průměrný tlak	$[Pa]$
Q	Velikost unikajícího průtoku	$[dm^3/min]$
Q_b	Unikající průtok bublinkový test	$[mbar \cdot l/s]$
Q_{He}	Průtok hélia	$[mbar \cdot l/s]$
Q_N	Objemový průtok	$[m^3 \cdot s^{-1}]$
Q_{nzt}	Objemová ztráta	$[m^3 \cdot s^{-1}]$
Q_z	Objemová ztráta ve vedení za vzdušníkem	$[m^3 \cdot s^{-1}]$
r_b	Poloměr bubliny	$[mm]$

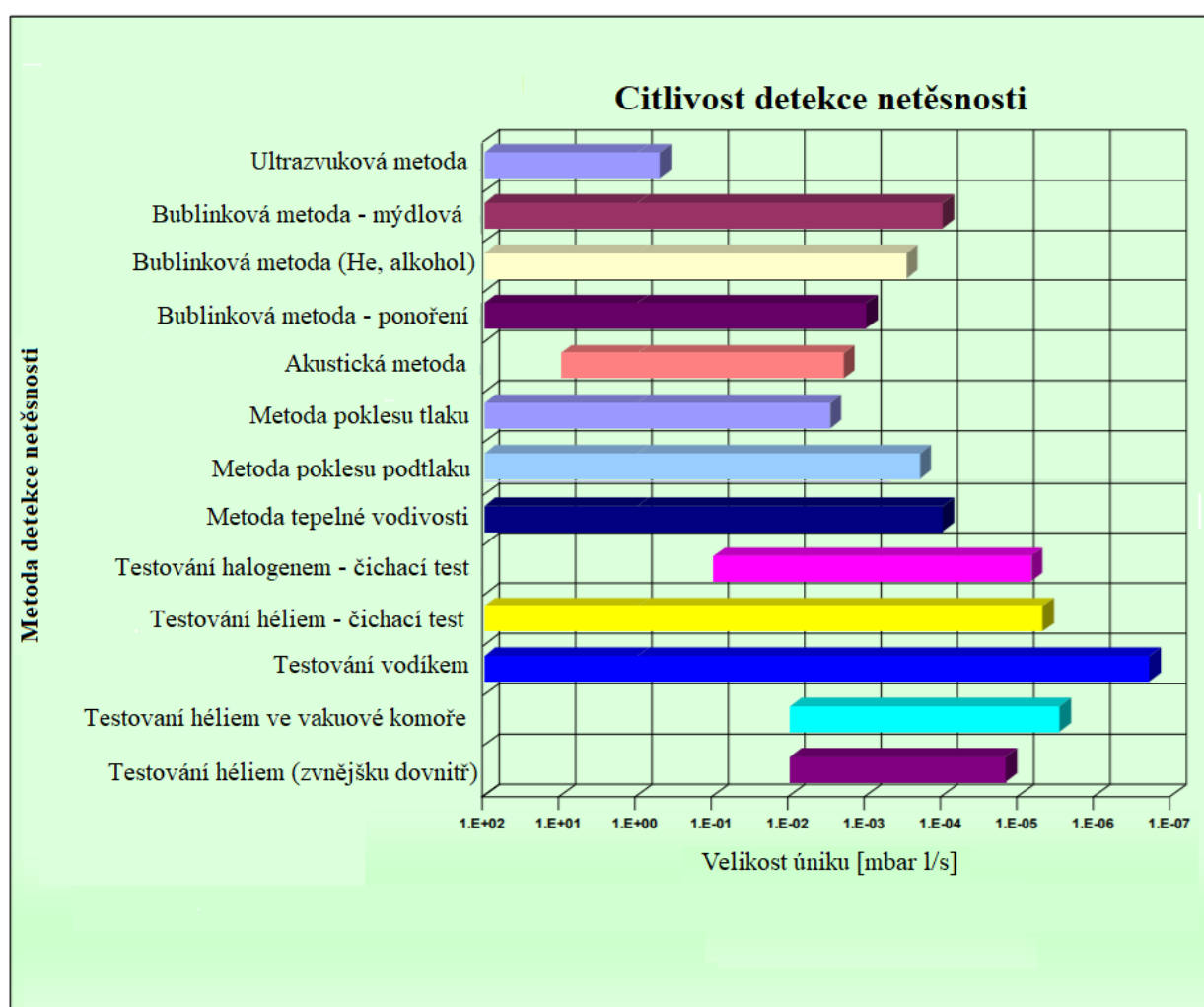
S_{He}	Rychlost čerpání hélia	$[cm^3]$
T	Teplota	$[^{\circ}C; K]$
t	Čas zkoušky	$[s]$
t_b	Čas potřebný k vytvoření první bubliny	$[s]$
U_{MAX}	Interval možného správného údaje	$[-]$
U_R	Rozsah měřicího přístroje	$[-]$
U_X	Rozsah naměřené průměrné hodnoty	$[-]$
V	Objem	$[cm^3; dm^3]$
V_b	Vnitřní objem bubliny	$[cm^3]$
Δp	Tlaková diference	$[Pa]$
Δt	Čas měření	$[s]$
τ	Měřený čas	$[s]$
$U(p_p)$	Rozšířená nejistota	$[-]$

Úvod

Tato diplomová práce se zabývá porovnáním zkoušek těsnosti vzdušníku o objemu 2l. Únik (netěsnost), může být definován jako trhlina, otvor nebo poréznost ve stěně, která obklopuje, uzavřené médium prvku či zařízení. I sebemenší netěsnost v konstrukci světlometu může vyústit v poškození nebo k tvorbě koroze uvnitř tělesa světlometu. Nejpravděpodobnější oblasti vzniku netěsností v uzavřených systémech jsou obvykle spoje, těsnící elementy, dosedací plochy, svarové a pájené spoje, a mnoho jiných. Postup zkoušky těsnosti je krok pro řízení kvality a zajištění celistvosti a bezporuchovosti stroje a měl by být přednostně jednorázový, nedestruktivní a bez jakéhokoliv vlivu na operátory zařízení nebo životní prostředí. V teoretické části této práce jsou popsány základní metody měření těsnosti jejich využití a citlivost k detekci netěsnosti. Pro měření těsnosti jsem zvolil 3 metody, dále popsané v teoretické části této práce. Jedná se o měření unikajícího průtoku a metody poklesu a nárůstu tlaku v uzavřeném objemu. Pro každou z metod byl sestaven experimentální obvod, na kterém byla prověřena těsnost 2l vzdušníku se simulovanou netěsností docílenou přes konstantně nastavený škrtecí ventil. Následně byly vytvořeny matematické modely všech 3 metod v softwaru Matlab a porovnány s hodnotami z vlastního měření těsnosti. Poté následovalo porovnání zkoušek těsnosti z hlediska skladby obvodu, náročnosti zpracování, spolehlivosti a časové náročnosti.

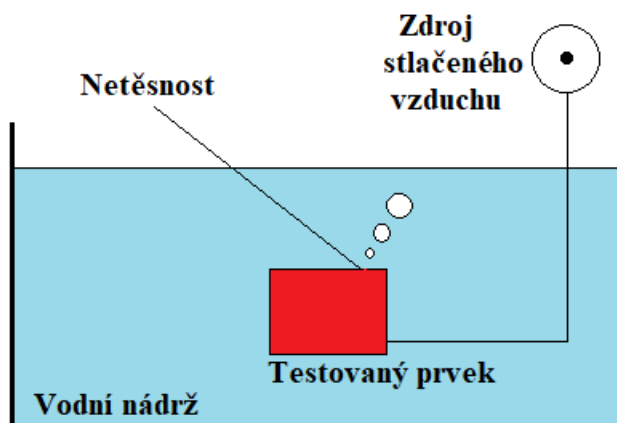
1. Metody testování těsnosti

Existuje mnoho metod testování těsnosti prvku či zařízení, které se odvíjejí od velmi jednoduchých principů jako například bublinkový test, nebo test poklesu tlaku v uzavřeném objemu až po systémy komplexní využívající značkovací plyn. Na rozdíl od kapalin u stlačitelných plynů závisí jejich objem na tlaku, který se vyjadřuje v jedné tisícině jednotky bar, tedy (mbar). $1 \text{ mbar} \cdot \text{l/s}$ se při atmosférických podmínkách rovná velikosti úniku 1 dm^3 plynu za sekundu. Nejčastěji používané metody zkoušení těsnosti v průmyslovém prostředí jsou: bublinkový test (zkouška pod vodou), bublinová metoda (mýdlová), tlaková a podtlaková metoda a metody využívající detekci značkovacího plynu (halogen, hélium a vodík). Jednotlivé metody se liší rozsahem citlivosti viz Obr.1 [1] [2]



Obr. 1 Citlivost detekce netěsnosti[1]

1.1 Bublínkový test těsnosti



Obr. 2 Bublínkový test těsnosti

Metoda lokalizace netěsnosti pomocí bublin vycházejících z testovaného prvku. Metoda spočívá v ponoření testovaného objektu pod vodní hladinu a následného natlakování. Jedná se o primitivní metodu, která slouží pouze k lokalizaci místa netěsnosti. U relativně malých netěsností může být obtížné, správně detekovat místo úniku. Hlavním omezením této metody je citlivost, k detekci netěsnosti. Vzhledem k sférické bublině o poloměru r_b , její vnitřní objem V bude: [1] [2]

$$V_b = 4/3 \cdot \pi \cdot r_b^3 \quad (1)$$

Nechť p_b je tlak uvnitř bubliny a t_b čas potřebný k vytvoření první bubliny, pak velikost unikajícího průtoku Q_b bude:

$$Q_b = (p_b \cdot V_b) / t_b \quad (2)$$

Dva klíčové parametry, které určují citlivost této metody, jsou nejmenší bublina, kterou dokáže obsluha detekovat a vyčkávací doba na generování bublin. Tato doba musí být kompatibilní s výrobní rychlostí a s pozorností obsluhy. Je rozumné domnívat se, že nejmenší bublina, kterou operátor může detekovat, má průměr 1 mm a že doba čekání je 30 sekund . Za předpokladu, že tlak uvnitř bubliny má hodnotu atmosférického tlaku je objem bubliny $V_b = 4,2 \cdot 10^{-3}\text{ cm}^3$ [1] [2]

a tudíž minimální detekovatelná netěsnost (unikající průtok) Q_b je podle rovnice (2):

$$Q_b = (p_b \cdot V_b) / t_b = 1000 \cdot 4,2 \cdot 10^{-6} / 30 = 1,4 \cdot 10^{-4}\text{ mbar} \cdot \text{l} / \text{s} \quad (3)$$

To je teoretická hodnota citlivosti bublinkové metody. Skutečná citlivost je silně ovlivněna mnoha vnější faktory, jako jsou podmínky osvětlení, zákal vody, umístění jednotky

a pohyb vody. Všechny tyto faktory spolu se závislostí operátora k lokalizaci netěsnosti omezuje užitečnou citlivost na $5 \cdot 10^{-4} \text{ mbar} \cdot \text{l/s}$. [1] [2]

Tipy, pro zlepšení této metody:

- Zvýšení vnitřního tlaku v krocích (přírůstcích) může zvýšit pravděpodobnost lokalizace a tím i snížit dobu potřebnou ke zjištění netěsnosti.
- K vodě lze přidat prací prostředek, který snižuje povrchové napětí pomáhá zabránit tomu, aby unikající plyn ležel na straně součásti.
- Teplá voda v nádrži někdy pomáhá zvýšit tlak uvnitř [1]

1.2 Bublínková metoda (mýdlová)

Namísto ponoření testovaného prvku pod vodní hladinu, je prvek nastříkán nebo potřen roztokem mýdla s vodou, díky kterému je poté možné pozorovat bubliny vytvořené unikajícím médiem z místa netěsnosti. Mýdlový bublinkový test je možné provádět více způsoby, např: aplikace pomocí kartáčů nebo nástřik pomocí tlakového rozprašovače pro velkoobjemové prvky nebo dlouhá potrubí. [1] [2]



Obr. 3 Mýdlový test těsnosti [8]

Navzdory své nízké nákladové ceně přináší tato metoda nevýhodu ze strany časové náročnosti, ať už při aplikaci mýdlového roztoku nebo jeho očištění z testovaného prvku či potrubí. Pro lepší účinnost této metody lze využít i vlastností mýdlového roztoku a jeho aditiv, například mýdlová směs s nemrznoucí bází pro lokalizace netěsností při nízkých teplotách nebo mýdlový roztok s nižší hustotou pro zjištění relativně malých úniků. Jedná se o nejlevnější metodu, která umožňuje detekci netěsnosti do $10^{-5} \text{ mbar} \cdot \text{l/s}$. [1] [2]

Tipy, pro zlepšení této metody.

- Zvýšení vnitřního tlaku v krocích (přírůstcích) může zvýšit pravděpodobnost lokalizace a tím snížit dobu potřebnou ke zjištění netěsnosti.
- Oblast, na kterou se má nanést mýdlový roztok by měla mít jednoduchý a snadno přístupný povrch.

1.3 Měření těsnosti dle ČSN 109006

Těsnost se prověřuje měřením tlaku v uzavřeném objemu po určenou dobu, v každém prostoru zkoušeného prvku při jmenovitém tlaku. Pokud se na hermetizaci použitých těsnění vyžaduje určitý tlakový spád, zkouška se vykoná i při minimálním tlaku. Tlakový spád v uzavřeném objemu, MPa , za čas t nesmí být větší než hodnota vypočítána ze vzorce.

$$\Delta p = \frac{q_d * t * p_a}{V} \quad (4)$$

Kde:

- q_d – je největší únik vzduchu [$cm^3 \cdot min^{-1}$] zodpovídající hodnotám těsnosti
- t – trvání zkoušky [min]
- p_a – tlak prostředí, ve kterém vznikají ztráty [MPa]
- V – uzavřený objem [cm^3] (sečtený objem komory prvku, měřicího přístroje, vedení oddělovacího prvku).

Dovolené jsou i jiné metody určování úniku vzduchu, které zabezpečují porovnatelné výsledky.[20]

1.4 Metoda poklesu tlaku v uzavřeném objemu

Tato metoda se zakládá na principu natlakování systému vysokotlakým plynem (stlačený vzduch). Poté je prvek izolován od přívodu tlaku a po stabilizačním období, je jeho vnitřní tlak monitorován v průběhu času. Tlaková ztráta Δp je měřena za čas Δt . Pokud tlak v systému klesá rychle, je v prvku přítomna netěsnost větších rozměrů, pokud klesá pomalu, jedná se o netěsnost menších rozměrů. Pokud je tlak v prvku neměnný v průběhu určitého časové období je považován za těsný. Velikost unikajícího průtoku Q lze snadno vypočítat s ohledem na objem prvku V . To znamená: [1] [2]

$$Q = (\Delta p \cdot V) / \Delta t \quad (5)$$

Citlivost detekce úniku závisí na času zkoušky, snímači tlaku a objemu prvku.

Například:

Objem prvku: $V = 1.5 \text{ dm}^3$;

Tlaková difference: $\Delta p = 70 \text{ Pa}$;

Čas měření: $\Delta t = 60 \text{ s}$,

poté platí: [1] [2]

$$Q = (\Delta p \cdot V) / \Delta t = \quad (6)$$
$$0,7 \cdot 1,5 / 60 = 1,7 \cdot 10^{-2} \text{ mbar} \cdot \text{l} / \text{s}$$

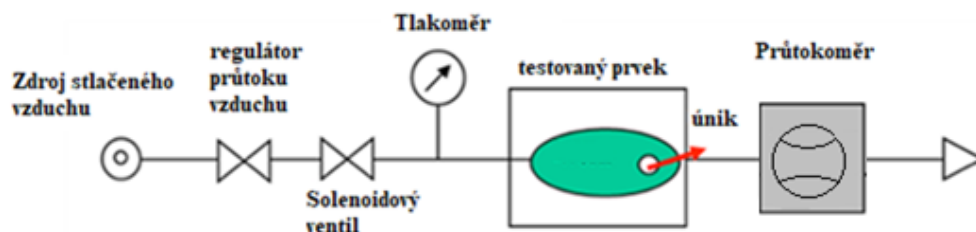
Několik vnějších faktorů, jako jsou změny teploty nebo mechanické deformace, mohou ovlivnit výsledek tohoto testu. Vnitřní tlak závisí na teplotě a teplotních výkyvech prostředí, tyto výkyvy mohou způsobit změny tlaku, které mohou ovlivnit průběh testu. Dlouhé zkušební časy umožňují více citlivé měření, mohou ale být časově velmi náročné, například u netěsností malých rozměrů. Čím vyšší je tlak v prvku, tím rychleji lze zjistit, zda není přítomna netěsnost. Nicméně se musí dbát na bezpečnost operátora. Bezpečnostní směrnice omezují maximální přípustnou hodnotu tlaku bez bezpečnostního vybavení na 2 MPa pro nízkotlaké prvky a 7 MPa pro vysokotlaké (při použití bezpečnostního vybavení dle směrnic EN378). Obvykle je mez citlivosti této metody v rozmezí $10^{-3} \text{ mbar} \cdot \text{l} / \text{s}$ bez tlakové difference a $10^{-4} \text{ mbar} \cdot \text{l} / \text{s}$ pro tlakovou metodu s tlakovou diferencí. Nevýhodou této metody je to, že neidentifikuje místo úniku, pouze jeho velikost. [1] [2]

1.5 Metoda nárůstu tlaku v uzavřeném objemu (metoda poklesu podtlaku)

Metoda nárůstu tlaku, spočívá v opačném principu jako metoda poklesu tlaku viz. kapitola 1.4. Testovaný prvek je odtlakován a po stabilizačním období, je měřen nárůst tlaku v průběhu času Δt , způsobený vniknutím média do prostor testovaného prvku. Tímto způsobem mohou být testovány pouze prvky schopné odolat vnějšímu tlaku. (např. plastové části s tenkými stěnami nemohou být testovány v důsledku nebezpečí zhroucení prvku). Výhodou této metody je menší citlivost ke změnám teploty (nižší tlak než atmosférický). Vakuometry jsou obvykle velmi citlivé i na malé změny tlaku proto je teoretická citlivost této metody vysoká až do hodnoty $1 \cdot 10^{-5} \text{ mbar} \cdot \text{l} / \text{s}$. Nicméně může být měření znehodnoceno navýšením tlaku v důsledku odpařování kapaliny uvnitř testovaného prvku. [1] [2]

1.6 Průtokový test těsnosti

Průtokový test netěsnosti je založen na principu použití konstantní velikosti průtoku a následného měření velikosti uniklého média pomocí průtokoměru. [6]



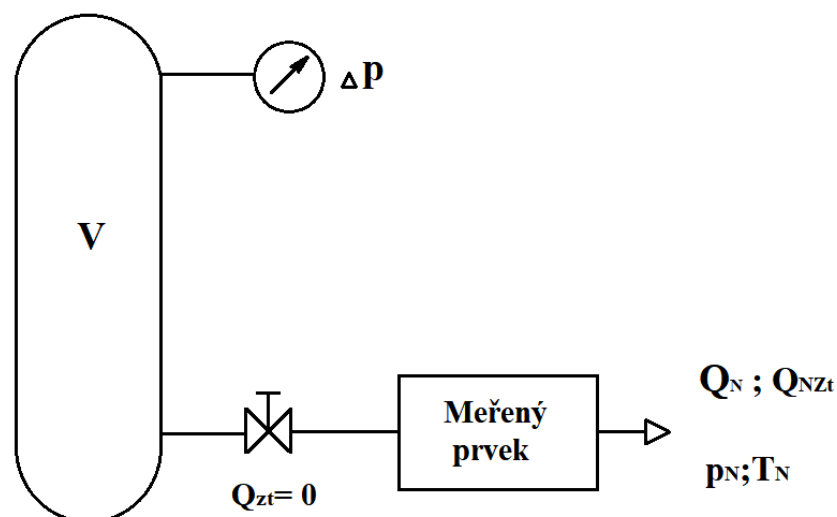
Obr. 4 Princip průtokového testu těsnosti [6]

Při použití v pneumatice za atmosférického tlaku je testovaný prvek umístěn na straně zdroje tlaku vzduchu a průtokoměr na straně atmosférického tlaku. Zkušební tlak je přiváděn do testovaného prvku přes regulátor průtoku vzduchu, který určuje průtok systémem. Uniklý vzduch je poté zobrazen průtokoměrem jako rozdíl mezi regulovaným průtokem před měřeným prvkem a průtokem zobrazeným průtokoměrem za testovaným prvkem. Velikost rozdílu určuje velikost případné netěsnosti. Pokud je regulovaný průtok roven průtoku za prvkem, dá se tento prvek považovat za těsný. [6]

Velikost unikajícího průtoku lze vypočítat dle metody měření průtoku vyprazdňováním vzdušníku (či jiné tlakové nádoby) je vhodná jak při měření průtoku, přičemž předpokládá vzdušník objemu V řádově m^3 , nebo pro měření ztrátového průtoku netěsnostmi, kde objem vzdušníku může být řádově desetiny m^3 . Princip zapojení je patrný z Obr. 5. Za předpokladu nulových ztrát ve vedení za vzdušníkem ($Q_z = 0$), měříme po otevření uzavíracího ventilu. Čas za nějž poklesne tlak ve vzdušníku např. o $\Delta p = 0,1 \text{ MPa}$. Za předpokladu, že změna teploty je zanedbatelná ($T = \text{konst}$) je objemový průtok $Q_N [m^3 \cdot s^{-1}]$ nebo objemová ztráta Q_{nz} přepočítána na normovaný stav. [9]

$$Q_N = \frac{V \Delta p T_N}{\tau p_N T_1} \quad (7)$$

Kde Δp a p_N je v $[MPa]$, měřený čas τ v $[s]$ a teplota T v (K) . [9]



Obr. 5 Měření průtoku vyprazdňováním vzdušníku [9]

1.7 Metody testování těsnosti značkovacím plynem

Termín " Metody testování těsnosti značkovacím plynem " popisuje skupinu zkušebních metod charakterizovaných detekcí značkovacího plynu proudící netěsností. Tyto metody se odlišují dle použitého značkovacího plynu. Nejběžněji používanými značkovacími plyny jsou: [1] [2]

- Halogenové plyny (CFC, HCFC a HFC)
- Hélium
- Směs (95% dusíku s 5% vodíku).

Halogenové plyny (CFC, HCFC a HFC)

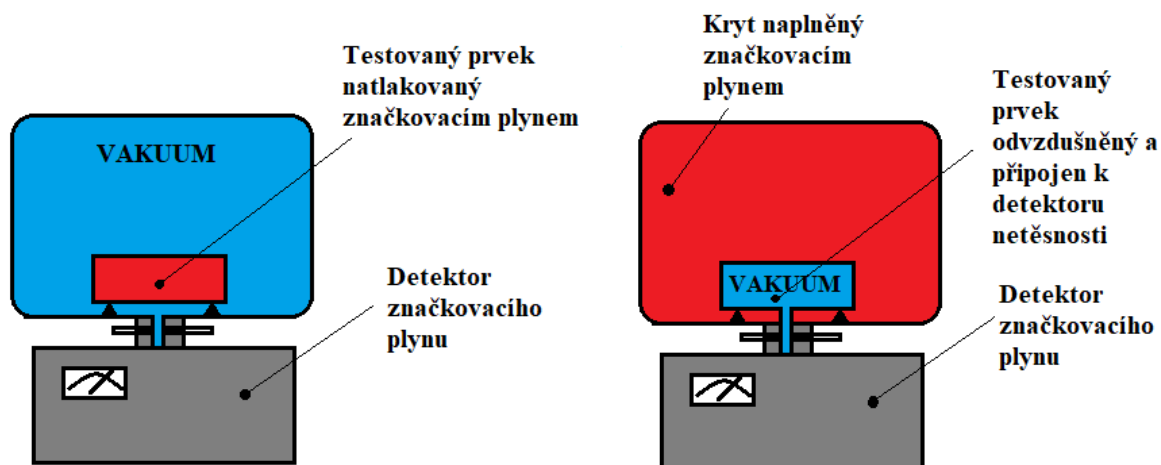
Navzdory jednoduchosti jejich elektronických detekčních zařízení, se halogeny používají čím dál méně v důsledku ochrany životního prostředí. Jedná se o látky obsahující prvky jako uhlík, fluor a chlór. Chladivo CFC je nyní zcela zakázáno používat nebo vyrábět ve všech zemích, na které se vztahuje Montrealský protokol. Chladicí kapaliny CFC, jako je kdysi populární R12, mají nejvyšší stupeň poškozování ozónové vrstvy a zároveň jsou skleníkovým plynem. Plyny HCFC jsou od ledna 2010 zakázány. Chladicí kapaliny HCFC, jako je například populární R22, mají potenciál poškozovat ozónovou vrstvu a je také skleníkovým plynem. HFC plyny jsou používány značně v každodenních systémech. Neexistuje žádný současný zákaz těchto plynů, ale odpovědné používání a inspekce zařízení jsou povinné dle předpisů "F gas". Chladicí kapaliny HFC nemají žádný potenciál poškozovat ozónovou vrstvu, ale chovají se jako skleníkový plyn. [1] [2]

Hélium

Hélium bylo úspěšně používáno jako značkovací plyn po dlouhou dobu kvůli jeho fyzickým vlastnostem. Jedná se o netoxický a nehořlavý, inertní plyn. Hélium se vyznačuje nízkou viskozitou a relativní molekulovou hmotností proto snadno prochází skrze praskliny (netěsnosti). Za stejných podmínek prostředí, protéká otvory 2,7 krát rychleji než vzduch. Vzhledem k tomu, že jeho koncentrace ve vzduchu je nízká lze snadno zjistit i nepratrtný přírůstek koncentrace helia. Existují však některé nedostatky. Hélium se pomalu rozkládá do atmosféry, takže v případě velkých úniků, bude jeho vysoká koncentrace kontaminovat oblast po dlouhou dobu, dokonce i hodiny. Hélium je také velmi nákladným plynem, i když je levnější než halogenové plyny většina vhodných detektorů helia je založena na principu hmotnostní spektrometrie, což je nákladné a jemné zařízení vyžadující zvýšenou péči a údržbu a je proto vhodnější pro laboratoře než pro výrobní průmysl. [1] [2]

Dusík s vodíkem

Vodík má řadu vlastností, které z něj činí vynikající značkovací plyn pro testování úniku ve výrobním prostředí. Lehce prochází skrze netěsnost rychleji než, hélium, je snazší ho vypustit a jeho atomy nepřilnavají k povrchu tak snadno jako atomy helia. Jedná se o plyny ekologicky šetrné a obnovitelné. Ještě důležitější je, že mají nejvyšší rychlost průchodu netěsnostmi. Vodíkové detektory značkovacího plynu používají polovodičové snímače MOS-FET a neobsahují žádné pohyblivé součásti, takže jsou takřka bezúdržbové. Čistý vodík by nikdy neměl být používán samostatně jako značkovací plyn, ale standardní průmyslová směs 5% vodíku v 95 % dusíku je levná, nehořlavá dle normy ISO 10156. Existují dva způsoby, jak provést testování těsnosti: Metoda: Zevnitř – ven (inside – out) a metoda zvnějšku – dovnitř (outside – in). U metody (Zevnitř – ven), je testovaná součást natlakována značkovacím plynem a upevněna do testovací komory, která je následně odvzdušněna. Jakýkoli únik značkovacího plynu netěsnostmi je zachycen uvnitř testovací komory. Obsah této komory, představuje celkový únik, který je poté analyzován detektorem netěsností. Zatímco u metody (Zvnějšku – dovnitř) je testovaný prvek odvzdušněn a poté umístěn do testovací komory naplněné značkovacím plynem. Ten poté netěsnostmi projde přes testovaný prvek až do detektoru značkovacího plynu. [1] [2]



Obr. 6 Metody zevnitř-ven (Inside-out) a zvnějšku dovnitř (Outside-in) [2]

1.8 Vakuová detekční komora (Zevnitř- ven)

Testování netěsností ve vakuové komoře je nejkomplexnější systémem detekce úniku, teoreticky lze objevit i velmi malé úniky v případě použití správného značkovacího plynu. Zařízení se skládá z jedné nebo více vakuových komor, které jsou dostatečně velké pro umístění prvku, který má být testován. Komora je připojena k odčerpávací skupině vybavené detektorem sledovacího plynu pro odvzdušnění komory a detekci značkovacího plynu.

Prvek, který má být otestován, je vložen do vakuové komory a naplněn (natlakován) značkovacím plynem. Poté je odvzdušněna vakuová komora a po stabilizační době, je únik plynu zaznamenán detektorem netěsnosti. Tato metoda nedokáže identifikovat, místo úniku, pouze zda je nebo není únik přítomen. Tzv. "go / no-go" test, takže nalezení přesného místa úniku vyžaduje další techniky. Mezi výhody této metody patří to, že jen velmi málo závislá na zkušenostech operátora. Citlivost této metody v závislosti na značkovacím plynu a zkušebním čase, může dosahovat až k hodnotě $10^{-10} \text{ mbar} \cdot \text{l/s}$, i když pro praktické použití v průmyslu se mezní hodnota pohybuje okolo $10^{-6} \text{ mbar} \cdot \text{l} / \text{s}$. Některé detektory značkovacích plynů vyžadují pravidelnou údržbu, aby se zajistila správná funkce, protože se jedná o složité systémy sestávající z vakuových čerpadel, hmotnostního spektrometru a podtlakových ventilů. [1] [2]

1.9 Vakuová detekční komora (Zvnějšku - dovnitř)

Je založena na opačném principu jako metoda (Zevnitř- ven). U této metody se prvek, který má být otestován, umístí do krytu uvnitř kterého, se vyskytuje značkovací plyn. Následně je prvek odvzdušněn. Po stabilizačním období je poté značkovací plyn vnikající do testovaného objektu detekováno detekčním systémem, kde je poté změřen jeho parciální tlak. Mezi výhody této techniky opět patří to, že jen velmi málo závislá na zkušenostech operátora. Citlivost této metody, v závislosti na značkovacím plynu a zkušebním čase, může dosahovat až $10^{-6} \text{ bar} \cdot \text{l/s}$, [1] [2]

1.10 Čichací a postřikovací test

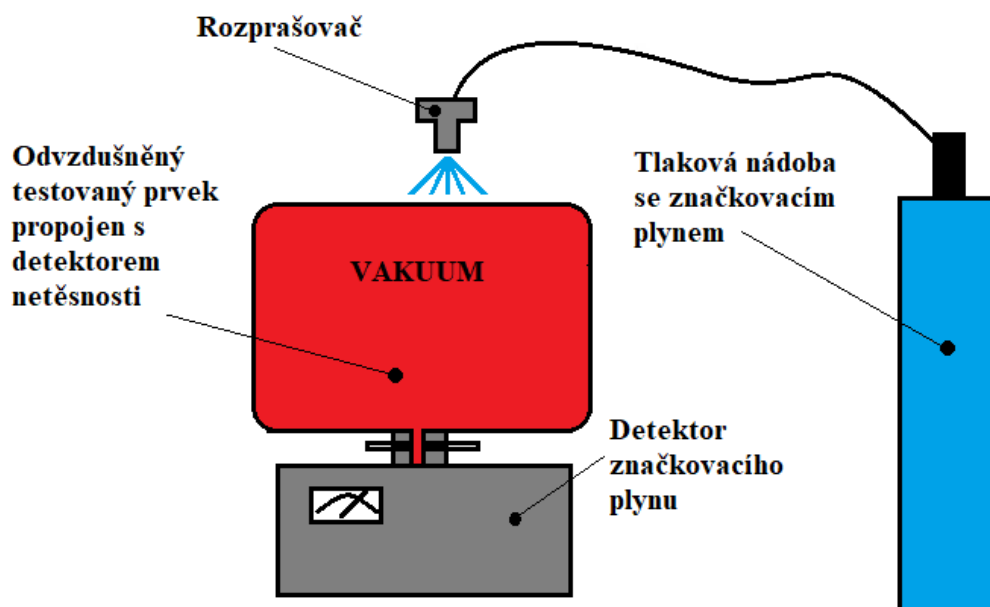
"Sniffing" neboli čichání je nejjednodušší realizací testu "(Zevnitř – ven)". Metoda čichací detekce netěsností využívá sondu nebo detektor pro zachycení (očichání) uniklého značkovacího plynu z testovaného prvku. Přesnost detekce netěsnosti závisí na citlivost sondy, rychlosti pohybu sondy a její vzdálenosti od případné trhliny (netěsnosti). Tato metoda má schopnost odhalit netěsnosti až do velikosti $10^{-7} \text{ mbar} \cdot \text{l/s}$, v závislosti na značkovacím plynu. Čichací test se nedoporučuje v prostředí s velkým objemem výroby, spíše pro lokalizaci netěsností při opravách a méně kusových zakázkách. [1] [2] [3]



Obr. 7 Čichací test [3]

Náklady na značkovací plyn mohou být významné a v případě zejména drahého plynu, je nutno zaručit použití vhodného systému pro zpětné získávání a obnovu značkovacího plynu. [1] [2]

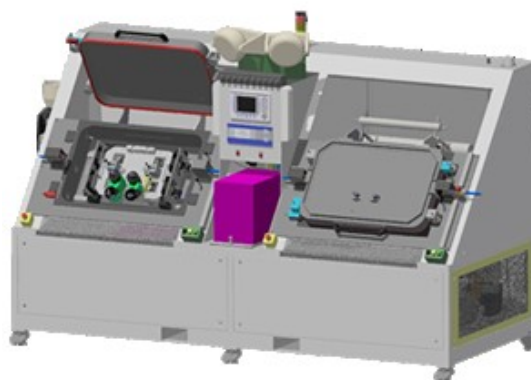
Postřikovací test netěsností, spočívá v odčerpání vzduchu z testovaného prvku a jeho následném postřiku značkovacím plynem, každé místo úniku je po prostoupení plynu, zaznamenáno detektorem netěsností. [1] [2]



Obr. 8 Postřikovací test [2]

1.11 Akumulační test těsnosti

Tato metoda je variací čichacího testu netěsností. Část, která se má testovat, je umístěna v uzavřeném ochranném krytu a poté natlakována značkovacím plynem. Čichací sonda je umístěna na vrcholu ochranného krytu, ve kterém se nahromadil uniklý značkovací plyn. Při nahromadění je stopovací plyn detektorem detekován snadněji. Akumulační metoda testování těsností závisí na akumulacním objemu. Čím větší je objem, tím delší je i čas potřebný k detekci úniku. Rychlost úniku a citlivost závisí na zbytkovém objemu a délce zkušebního času. Přírůstek parciálního tlaku stopovacího plynu Δp , průtok značkovacího plynu Q , zbytkový objem V a zkušební čas Δt lze vyjádřit rovnicí (6) Tato metoda se používá ve velmi speciálních aplikacích (například pro velmi malé součásti). [1] [3]



Obr. 9 Akumulační detektor netěsností [3]

1.12 Halogenová detekce netěsností

Pracovní princip halogenového detektoru netěsností je založen na principu měření emise pozitivních iontů v důsledku přítomnosti halogenidu uvnitř elektronického článku. Tento iontový proud je závislý na koncentraci halogenového plynu což odpovídá velikosti netěsnosti. Méně citlivé detektory jsou založeny na principu absorpce infračerveného světla halogenovým plynem. Hlavní aplikace halogenových detektorů jsou pro metodu inside-out, jejich použití pro metodu (Zvějšku-dovnitř) je omezené. U Metody (Zevnitř- ven), jsou používány v režimu detektor-sonda, který vyžaduje natlakování měřeného prvku značkovacím plynem obsahujícím organický halogenid, jako jsou plyny CFC, HCFC a HFC. Povrch prvku je pak skenován pomocí čichací sondy citlivé na stopy plynu obsahujícího halogen. Dosažitelná citlivost může být až do $10^{-5} \text{ mbar} \cdot \text{l} / \text{s}$. [1] [2]



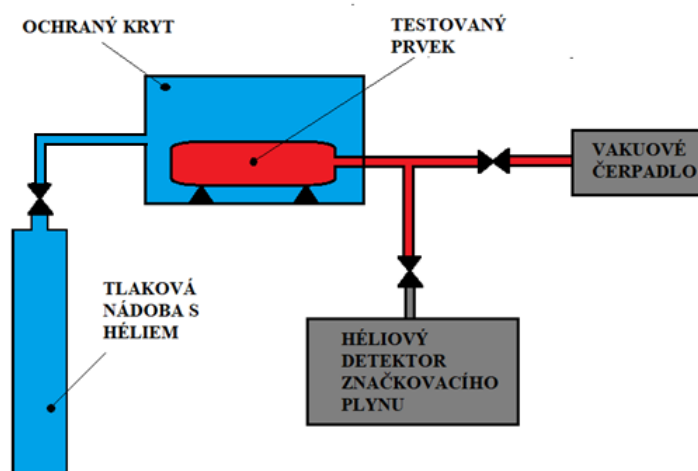
Obr. 10 Halogenový detektor netěsnosti wjl-6000 [5]

U metody (Zvějšku-dovnitř) je měřený prvek odvzdušněn a připojen na halogenový detektor poté je na jeho povrch nastříkán jeden z halogenových plynů. Po prostoupení plynu prvkem je netěsnost zaznamenána detektorem. Citlivost této metody se pohybuje okolo $5 \cdot 10^{-7} \text{ mbar} \cdot \text{l} / \text{s}$ a používá se při hrubém, jemném a vysokém vakuu. Halogenové detektory

netěsností se používají většinou v údržbě chladicích a klimatizačních zařízeních, kvůli jejich vysoké citlivosti na plyny používané v těchto zařízeních.

1.13 Detektor netěsností - hélium (Zvějšku-dovnitř)

U heliového detektoru netěsností s metodou (Zvějšku-dovnitř) se testovaný prvek umístí do ochranného krytu vhodného pro uchovávání hélia a připojí k vakuovým čerpadlům, vybaveným hmotnostním spektrometrem. Tento druh testování netěsností se sestává z odvzdušnění prvku a naplnění ochranného krytu héliem. Hélium poté projde netěsností přímo do heliového detektoru značkovacího plynu. [1]



Obr. 11 Princip detektoru netěsnosti pro hélium (Zvějšku-dovnitř)

Hélium má vzhledem k jeho atomovým vlastnostem vysokou schopnost penetrace. Tudíž hmotnostní spektrometr dokáže detekovat helium, které uniklo do součásti přes praskliny a porozity, které by nešlo detekovat pomocí jiných testovacích systémů. Prvek je odvzdušněn na méně než 15 Pa . Citlivost této metody se pohybuje okolo $1,8 \cdot 10^{-5} \text{ mbar} \cdot \text{l} / \text{s}$. Existuje několik praktických realizací této testovací metody. Testovací systém může být navržen s jednou nebo více stanicemi, obvykle dvěma kvůli rychlosti požadavku na výrobu, protože multi-stanice stroje umožňují testování několika částí najednou. [1]

1.14 Detektor netěsností - hélium (Zevnitř- ven)

Při metodě "inside-out" heliové detekce se prvek, který má být otestován, natlakuje značkovacím plynem (hélium). Poté operátor přesouvá čichací sondu přes povrch součásti v místech, ve kterých by se mohla nacházet netěsnost. Rozměr ustí sondy určuje průto a detekční výkon. Pro průtok hélia Q_{He} , rychlost čerpání S_{He} a parciální tlak hélia p_{He} , poté platí:[1]

$$Q_{He} = p_{He} \cdot S_{He} \quad (8)$$

Při koncentraci hélia v atmosféře $5ppm$, je jeho parciální tlak $0,5 Pa$ a při standardní rychlosti čerpání $1cm^3$ poté platí: [1]

$$Q_{He} = p_{He} \cdot S_{He} = 0.5 \cdot 1 \cdot 10^{-6} = 5 \cdot 10^{-7} mbar \cdot l/s \quad (9)$$

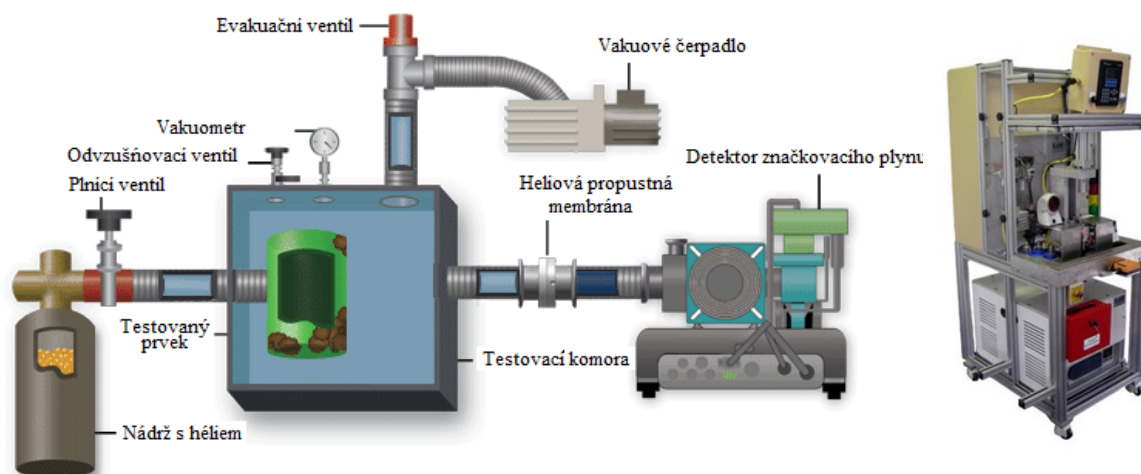
Čím pomalejší je rychlost čerpání, tím vyšší je citlivost. Avšak čím delší je doba čerpání, tím delší je i doba průchodu hélia hmotnostním spektrometrem. Nejčastěji používaná rychlost čerpání, kompromis mezi citlivostí a dobou odezvy je $1 cm^3$. Rychlost pohybu sondou a její vzdálenost od testovaného prvku jsou kritickými faktory. Čím blíže je sonda, tím vyšší je koncentrace hélia vstupující do hmotnostního spektrometru a tím i lepší kvalita testu. Na druhou stranu, čím rychleji se sonda pohybuje tím menší je šance, že je hélium sondou přijato. [1]

1.15 Postřik hélíem (Zvnějšku - dovnitř)

U metody postřiku (Zvnějšku-dovnitř) je testovaný prvek připojen vakuovým mechanismům a hmotnostnímu spektrometru. Prvek je odvzdušněn a jeho povrch je "sondován" vhodným difuzorem, ostrým proudem hélia. Průchodem přes detektor se zjistí jakékoliv hélium vnikající do prvku skrze netěsnost. Tato metoda může být použita tam, kde je nutné lokalizovat úniky malých rozměrů. Nicméně, stejně jako čichací metoda, závisí její citlivost opět na zkušenostech operátora. Hélium má sklon k akumulaci a poté k nasycení pracovní plochy, pokud není dobře odvětráno. Za těchto podmínek se lokalizace míst úniku stává obtížným. Vpřípadě velkého úniku projde hmotnostním spektrometrem velké množství hélia, které zapříčiní delší dobu testování kvůli kompatibilitě hladiny hélia s testovací hladinou detektoru. [1] [2]

1.16 Testování netěsnosti hélíem ve vakuové komoře (Zevnitř- ven)

U tohoto způsobu testování, známé také jako "globální test vysokým vakuem" je prvek k testování umístěn do vzduchotěsné komory vybavené servisními hadicemi a vakuovou čerpací skupinou s hmotnostním spektrometrem. Následně je prvek odvzdušněn a poté ihned natlakován značkovacím plynem hélíem. Komora je odvzdušněna a po dosažení vhodné hladiny vakua je otevřen vstupní ventil detektoru netěsnosti. Detektor poté začne analyzovat molekuly zbytkového značkovacího plynu v komoře. [1] [2] [4]

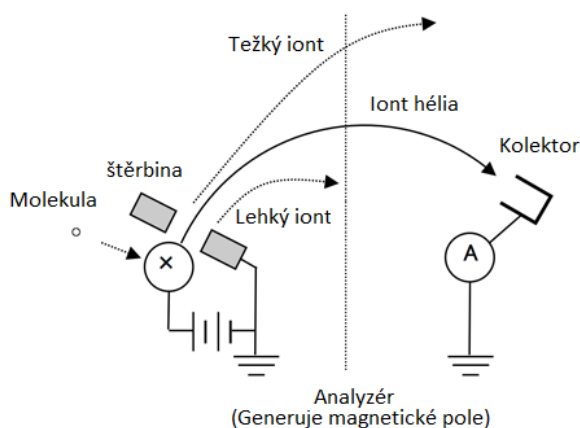


Obr. 12 Testování těsnosti ve vakuové komoře[4]

Metoda testování netěsnosti za pomoci hélia ve vakuové komoře má několik výhod. Není využíván čichací detektor, proto je toto měření jen minimálně závislé na zkušenostech operátora. Citlivost této metody, může v laboratorních podmínkách dosahovat až k hodnotě $10^{-10} \text{ mbar} \cdot \text{l} / \text{s}$. Nicméně při praktickém použití v chladicím průmyslu se citlivost pohybuje okolo hodnoty $10^{-6} \text{ mbar} \cdot \text{l} / \text{s}$. [1] [2] [4]

Princip detektoru hélia

Hélium uniklé skze netěsnost je ionizováno elektronovým paprskem z vlákna uvnitř iontové komory analyzovací trubice. Ionty se zrychlují a prochází štěrbinou, po které narazí na magnetické pole generované analyzátelem. Vzhledem k tomu, že kruhová trajektorie iontů závisí na jejich hmotnosti, může kolektor zachytit pouze ionty hélia a detekovat tak jen značkovací plyn hélium. [6]



Obr. 13 Princip detektoru hélia [6]

1.17 Vodíková metoda detekce (Zevnitř- ven)

Stejně jako u ostatních metod je prvek, který má být testován odvdzdušněn a poté natlakován směsí vodíku s dusíkem. Operátor poté pohybuje sondou kolem míst možného úniku. Ve srovnání s testováním netěsnosti heliem se tato metoda vyznačuje stejnou závislostí operátora na citlivost této metody, ale má mnoho výhod.

Vodík je ideální pro testování netěsnosti. Je to nejlehčí prvek s nejvyšší molekulární rychlostí a nižší viskozitou než jakýkoli jiný plyn. Rychle se smísí s jakýmkoliv jiným plynem snadno se rozptýluje. Detektory jsou založeny na polovodičových snímačích, a protože neobsahují téměř žádné pohyblivé díly, a tudíž jsou téměř bezúdržbové a proto i ideální pro použití v průmyslovém prostředí a jsou zcela bezúdržbové. Detektory rovněž nejsou ovlivněny přítomností jiných plynů. Kromě toho může být sonda vybavena ochranným krytem, který jí umožňuje použití na mokré předměty. Mezi nevýhody vodíku ovšem patří to, že z místa netěsnosti uniká téměř ve svislém směru, proto by detektor měl být umístěn přímo nad netěsností. [1] [7]

2. Experimentální ověření měření těsnosti

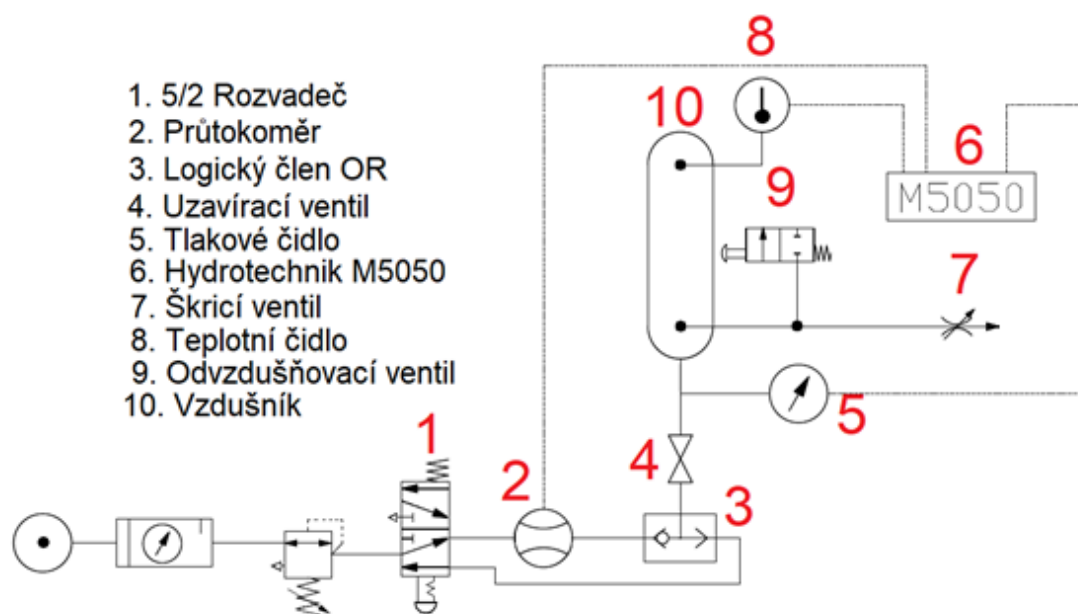
V této kapitole je popsán výběr metod k prověření těsnosti uzavřeného objemu. K experimentálnímu ověření těsnosti byl použit vzdušník o objemu 2l. Netěsnost vzdušníku byla simulována skrze škrtecí ventil.

2.1 Výběr zkušební metody

Každá metoda testování těsnosti má své výhody i nevýhody. Při výběru vhodné metody testování těsnosti by se kromě citlivosti testovací metody, měli brát v potaz i parametry související s opakovatelností testu, jeho přesností, spolehlivostí, náročností na zpracování a náklady na provedení testu. V případě velkosériových kontrol těsnosti je při výběru metody testování těsnosti využívající značkovací plyn důležitým parametrem i cena použitého značkovacího plynu. Ve většině případů je nutné zajistit správný způsob zpětného získávání použitého značkovacího plynu. Pro měření těsnosti vzdušníku jsem zvolil 3 měřicí metody již rozebrané v teoretické části diplomové práce.

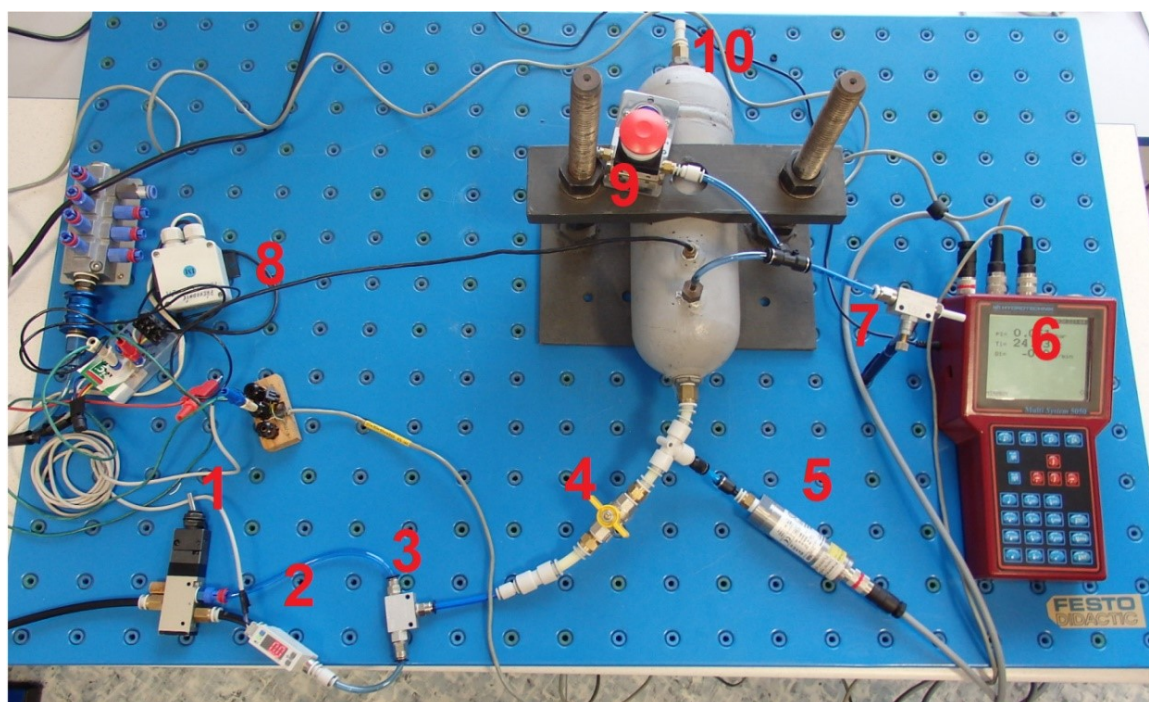
2.2 Měření unikajícího průtoku

Princip této metody je podobný jako viz. 1.6 průtokový test těsnosti. Liší se v použití zdroje konstantního tlaku místo zdroje konstantního průtoku. Namísto porovnání konstantního a měřeného průtoku jako naznačuje tato metoda, budeme sledovat velikost unikajícího průtoku skrze simulovanou netěsnost v závislosti na konstantním tlaku v systému udržovaného skrze redukční ventil. Test spočívá v natlakování uzavřeného objemu se simulovanou netěsností na konstantní tlak a zaznamenání nárůstu plnicího (unikajícího) průtoku vzniklého doplňováním objemu uniklého skrze netěsnost v průběhu určitého časového úseku (doby zkoušení). Schema zapojení pneumatického obvodu je uvedeno na Obr. 14. Obvod se skládal z prvků popsanych v kapitole 3. Specifikace prvků měřících obvodů. Jako uzavřený objem obvodu jsem použil vzdušník (10) o objemu 2l, což téměř odpovídá velikosti objemu automobilového světlometu. K objemu vzdušníku byl připočítán objem přilehlého vedení k senzorům, i objem samotného tlakového senzoru. Netěsnost byla simulována skrze škrticí ventil (6), nastavený na konstantní průtok $1 \text{ dm}^3/\text{min}$. Na vzdušník byl připojen převodník teplota-napětí (9), kterým byl měřen průběh teploty při každém měření. Tlakové čidlo (5) kterým byl měřen tlak v obvodu, průtokoměr (2) kterým byl měřen plnicí (unikající) průtok i převodník teplota-napětí (9) byly připojeny k měřicímu systému a vyhodnocovacímu zařízení Hydrotechnik M5050 (6). Pro tuto metodu byla zaznamána 3 měření pro každou tlakovou hodnotu. Každé měření probíhalo po dobu 70s se vzorkovací frekvencí 50ms nastavenou na zařízení Hydrotechnik. Pro každé měření bylo zaznamenáno více než 1400 hodnot v rozsahu 70s. Měření probíhalo dle následujícího postupu: Po natlakování kompresoru byl redukčním ventilem v obvodu udržován konstantní tlak pro každé měření (postupně 0,5; 0,4; 0,2; 0,1 MPa). Stlačený vzduch proudil přes mechanický 5/2 rozvaděč, logický člen OR a přes uzavírací ventil do vzdušníku (10). Vzdušník byl plněn po dobu 5s, po této době nutné k ustálení tlaku ve vzdušníku byl přepnut 5/2 rozvaděč (1). Po přepnutí 5/2 rozvaděče (1) byl stlačený vzduch veden přes průtokoměr (2), logický člen OR (3) a otevřený uzavírací ventil (4) do vzdušníku (8) kde udržoval nastavený konstantní tlak 0,5 MPa. Při poklesu nastaveného tlaku, byl redukční ventilem tento úbytek kompenzován tak aby se zachoval konstantní tlak v obvodu. Velikost tohoto průtoku byla zaznamenána po dobu 70 sekund pomocí průtokoměru (2). Po dokončení každého jednotlivého měření byl vzdušník odvzdušněn odvzdušňovacím ventilem (7) na atmosférický tlak a teprve poté bylo započato další měření.



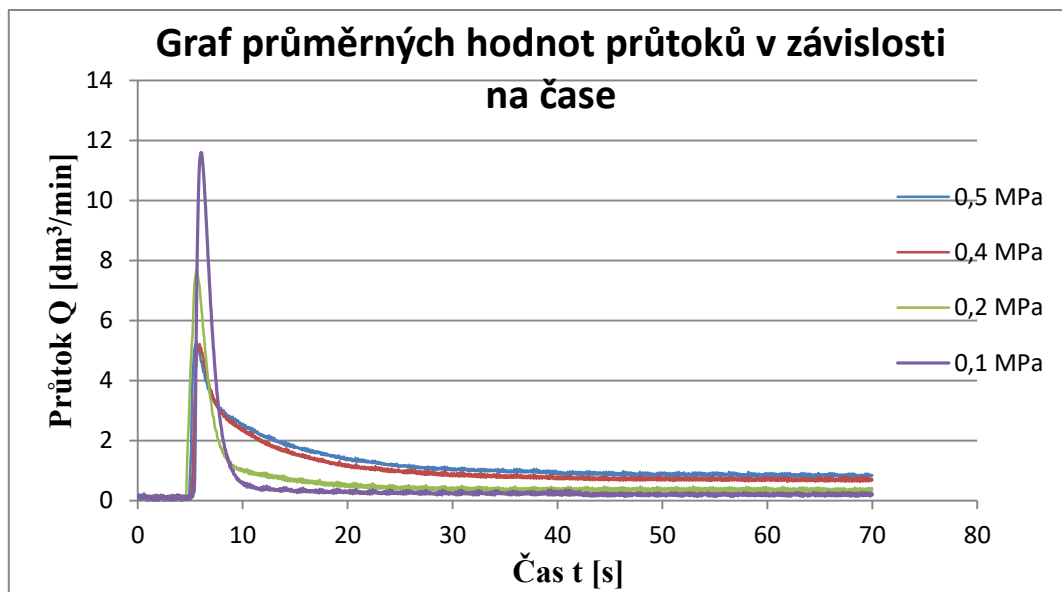
Obr. 14 Schéma obvodu pro měření unikajícího průtoku

V laboratoři pneumatických zařízení na VŠB-TUO byl tento obvod poté sestaven z prvků jejichž podrobný popis je uveden v kapitole 3. Na takto sestaveném obvodu viz. Obr. 15 proběhlo měření unikajícího průtoku.



Obr. 15 Fotografie obvodu pro měření unikajícího průtoku

Pro každý nastavený tlak proběhla 3 měření., ze kterých byly vytvořeny průměrné hodnoty a průběhy vyneseny graficky jako závislost průtoku (úniku) stlačeného vzduchu z měřeného prvku na čase viz. Obr. 16.



Obr. 16 Graf průměrných hodnot unikajících průtoků

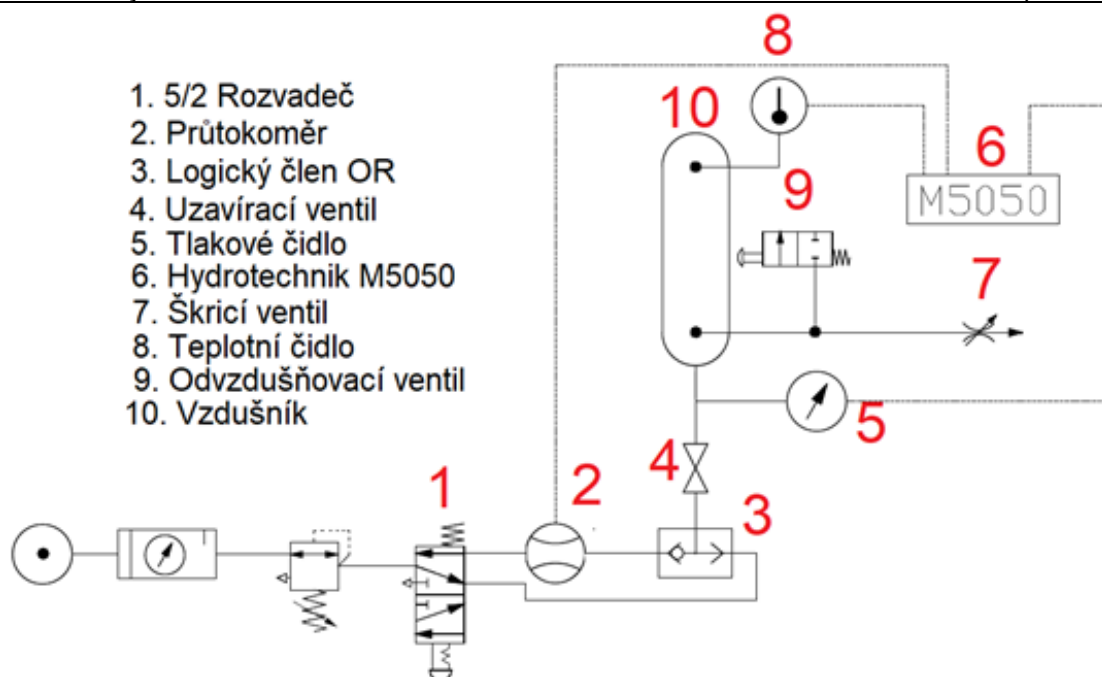
Z grafu viz Obr.16 je zřetelné postupné ustálení průtoku po skokové změně způsobené přepnutím 5/2 rozvaděče který nasměroval stlačený vzduch do průtokoměru. Při všech nastavených tlacích byla doba ustálení průtoku rozdílná. Čím vyšší byl nastavený konstantní tlak, tím delší byla doba potřebná k ustálení průtoku. Například při nastaveném tlaku $0,1 \text{ MPa}$ byla doba ustálení průtoku cca 15 s zatímco při tlaku $0,5 \text{ MPa}$ byla tato doba více než dvojnásobná. Použitý průtokoměr měl měřicí rozsah $1-50 \text{ dm}^3/\text{min}$ a měřené netěsnosti byly tedy mimo měřitelný rozsah. Na katedře byl k dispozici i průtokoměr s rozsahem $0-1 \text{ dm}^3/\text{min}$, ovšem pouze do tlaku 3 bar , navíc při přepínání rozvaděče docházelo k výraznému nárůstu průtoku. Z tohoto důvodu tento průtokoměr nemohl být při měření použit. Při kontrolním proměření použitého průtokoměru bylo zjištěno, že hodnoty naměřené při tlaku 5 bar lze považovat za správné, i když jsou mimo měřicí rozsah. Hodnoty průtoku při nižších tlacích se již lišily a nelze je z hlediska velikosti považovat za relevantní. Nicméně doby do ustálení konstantního průtoku považuji za správné. Kompletní naměřená a vypočítaná data jsou uvedena v CD příloze této práce ve složce "Měření".

Tabulka č.1 ustálení průtoků

Nastavený tlak [MPa]	0,1	0,2	0,4	0,5
Čas ustálení průtoků [s]	15s	25s	35s	40s
Ustálený průtok [dm^3/min]	0,252	0,317	0,681	0,843

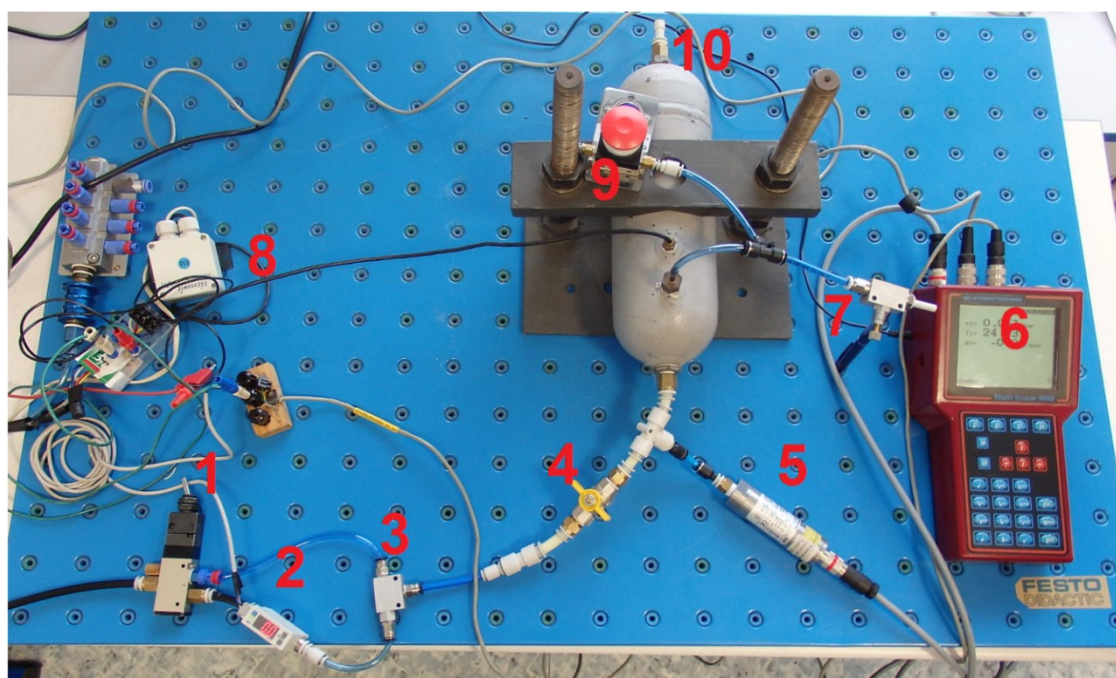
2.3. Měření metody poklesu tlaku v uzavřeném objemu

Princip této metody spočívá v natlakování uzavřeného objemu se simulovanou netěsností, na konstantní tlak a zaznamenání tlakového úbytku přes tuto netěsnost v průběhu určitého časového úseku (doba zkoušení). Schema zapojení pneumatického obvodu je uvedeno na Obr. 17. Obvod byl sestaven z prvků popsanych v kapitole 3. Specifikace prvků měřících obvodů. Jako uzavřený objem jsem použil vzdušník (10) o objemu 2 l , což téměř odpovídá velikosti objemu automobilového světlometu. Do objemu vzdušníku byl připočítán objem přilehlého vedení k senzorům, i objem samotného tlakového senzoru. Netěsnost byla simulována skrze škrticí ventil (7), který byl nastaven na konstantní průtok $1 \text{ dm}^3/\text{min}$. Na vzdušník byl připojen převodník teplota-napětí (8), kterým byl měřen průběh teploty při každém měření. Tlakové čidlo (5) kterým byl měřen tlakový úbytek, průtokoměr (2) i převodník teplota-napětí byly připojeny k měřicímu systému a vyhodnocovacímu zařízení hydrotechnik M5050 (6). Skrze které proběhl záznam všech hodnot. Pro tuto metodu bylo zaznamenáno 5 měření pro každou tlakovou hodnotu. Každé měření probíhalo po dobu 70 s , se vzorkovací frekvencí 50 ms nastavenou na zařízení Hydrotechnik M5050. Pro každé měření bylo zaznamenáno více než 1400 hodnot v rozsahu 70 s . Měření probíhalo dle následujícího postupu: Po natlakování kompresoru byl redukčním ventilem v obvodu nastaven konstantní tlak pro každé měření (postupně $0,5$; $0,4$; $0,2$; $0,1 \text{ MPa}$). Stlačený vzduch proudil přes mechanický $5/2$ rozvaděč (1), logický člen OR (3) a přes uzavírací ventil (4) do vzdušníku (10). Vzdušník (10) byl plněn po dobu 10 sekund , po této době nutné k ustálení tlaku ve vzdušníku byl uzavřen uzavírací ventil (4). Po uzavření ventilu (4) byl zaznamenáván pokles tlaku pomocí tlakového čidla (5) ve vzdušníku po dobu 60 s .

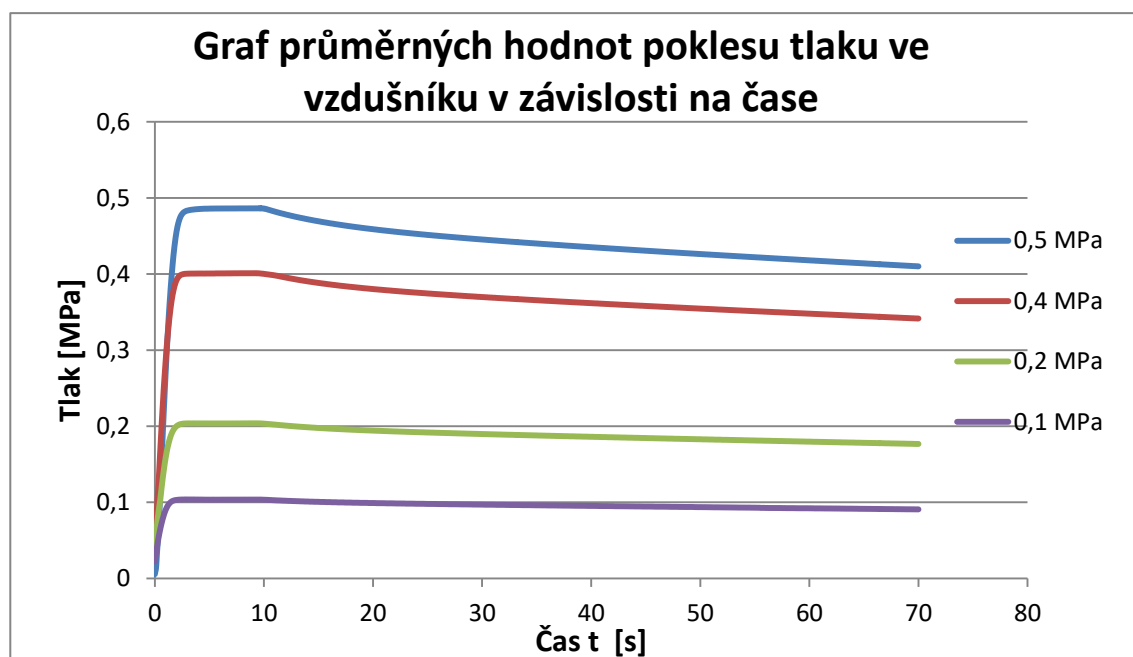


Obr. 17 Schéma měřicího obvodu pro měření poklesu tlaku v uzavřeném objemu

V laboratoři pneumatických zařízení na VŠB-TUO byl tento obvod poté sestaven z prvků jejichž podrobný popis je uveden v kapitole 3. Na takto sestaveném obvodu viz. Obr.18 proběhlo měření těsnosti metodou poklesu tlaku v uzavřeném objemu.



Obr. 18 Fotografie měřicího obvodu pro měření poklesu tlaku v uzavřeném objemu



Obr. 19 Graf průměrných hodnot měření poklesu tlaku v uzavřeném objemu

V grafu viz. Obr. 19 je vidět průměrný tlakový pokles pro měření těsnosti světlometu dle metody poklesu tlaku v uzavřeném objemu pro všechny hodnoty konstantního tlaku. Pro každý nastavený tlak proběhlo 5 měření, ze kterých byly vytvořeny průměrné hodnoty a průběhy vyneseny graficky jako závislost tlaku stlačeného vzduchu uvnitř měřeného prvku v závislosti na čase. Průměrný pokles tlaků všech měření se pohyboval okolo 14,1 % od začátku do konce měření. Kompletní naměřená a vypočítaná data jsou uvedena v CD příloze této práce ve složce "Měření".

Tabulka č.2 Průměrný tlakový pokles ve vzdušníku

Průměrný tlak na začátku měření [MPa]	Průměrný tlak na konci měření [MPa]	Tlakový pokles [%]
0,4865	0,41006	15,63
0,4010	0,34952	14,71
0,2037	0,1767	13,28
0,1035	0,09072	12,39

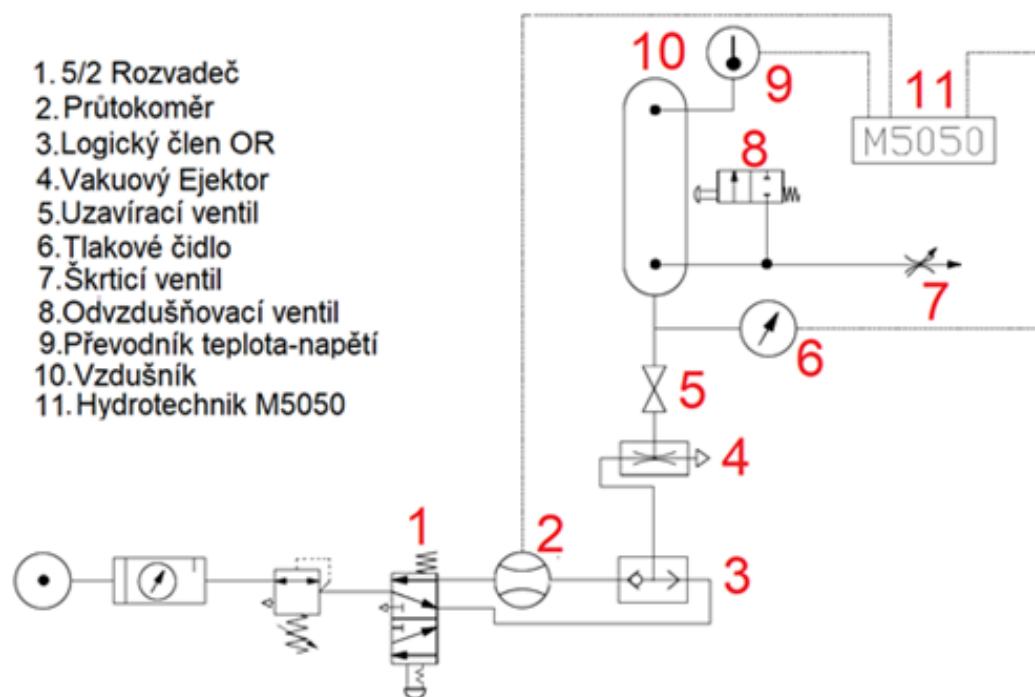
Objem vzdušníku s vedením = 2,046 dm³; velikost netěsnosti (1dm³/min)

V tabulce č. 2 jsou uvedeny výsledky průměrných hodnot tlaků na začátku a konci měření spolu s tlakovým poklesem od začátku měření v [%] pro všechny hodnoty nastaveného konstantního tlaku. Z tabulky č.2 je zřetelné, že pokles tlaku závisí na velikosti tlaku v měřeném prvku (čím větší tlak tím větší byl i tlakový pokles v průběhu měření).

2.4 Měření metody nárůstu tlaku v uzavřeném objemu

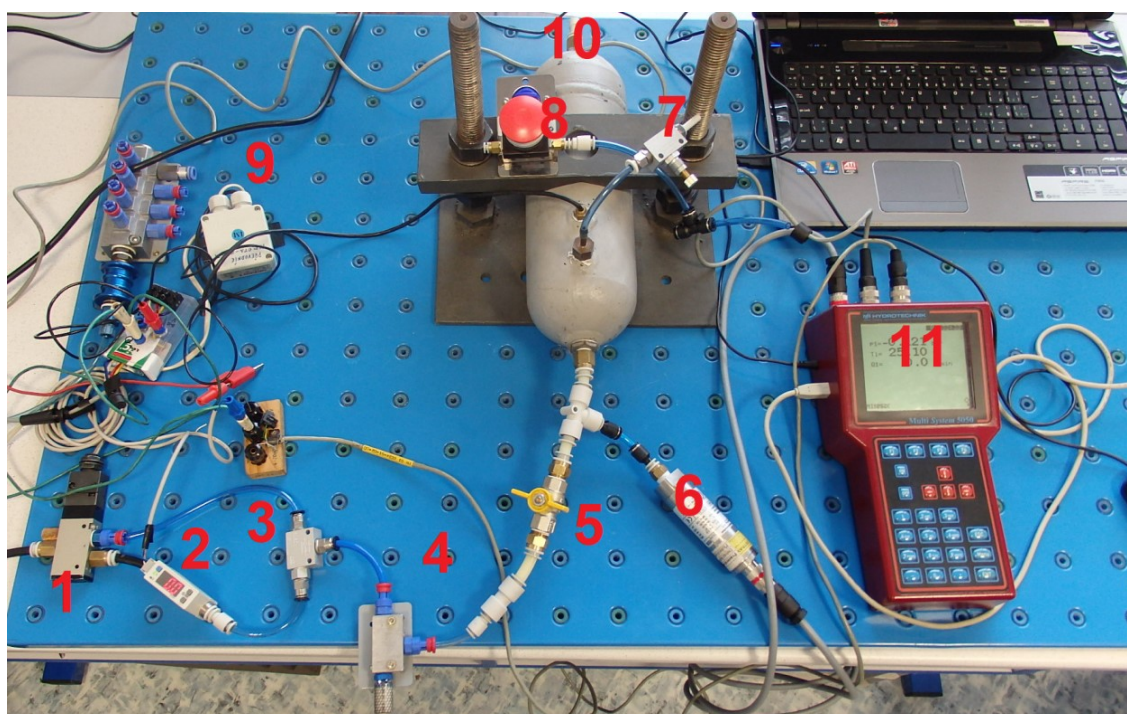
Princip této metody spočívá v odvzdušnění uzavřeného objemu se simulovanou netěsností na konstantní hodnotu podtlaku a zaznamenání tlakového přírůstku přes tuto netěsnost v průběhu určitého časového úseku (doby trvání zkoušky). Měřicí obvod pro tuto metodu se skládal ze stejných prvků jako obvod pro měření netěsnosti dle metody poklesu tlaku v uzavřeném objemu jen s rozdílem, že byl do obvodu připojen vakuový ejektor (4), skrze který proběhlo odtlačování vzdušníku na hodnoty podtlaku uvedené ve vyhodnocení experimentu. Jako uzavřený objem jsem použil vzdušník (10) o objemu 2l, což téměř odpovídá velikosti objemu automobilového světlometu. Do objemu vzdušníku byl připočítán objem přilehlého vedení k senzorům. Netěsnost byla simulována skrze škrticí ventil (7), který byl nastaven na konstantní průtok $1 \text{ dm}^3/\text{min}$. Na vzdušník byl připojen převodník teplota-napětí (8.), kterým byl měřen průběh teploty při každém z měření. Tlakové čidlo (6.) kterým byl měřen tlakový nárůst v průběhu času, průtokoměr zařízení hydrotechnik M5050 (6.). Měření probíhalo dle následujícího postupu:

Redukčním ventilem byl v obvodu nastaven konstantní podtlak pro každé měření. Podtlak byl vyvozen skrze vakuový ejektor (4). Vzdušník (10) byl odvzdušňován do doby než, se dosáhlo konstantní hodnoty podtlaku, po této době nutné k ustálení podtlaku ve vzdušníku byl uzavřen uzavírací ventil (4) a bylo započato měření. Po dobu měření 70s byl zaznamenáván nárůst tlaku ve vzdušníku způsoběný vnikáním média do prostor vzdušníku skrze konstantní netěsnost simulovanou skrze škrticí ventil (7) nastavený na konstantní průtok $1 \text{ dm}^3/\text{min}$. Po dokončení každého jednotlivého měření byl vzdušník zavzdušněn odvzdušňovacím ventilem (9) na atmosférický tlak a teprve poté bylo započato další měření. Pro tuto metodu byla zaznaméno 5 měření pro každou tlakovou hodnotu. Každé měření probíhalo po dobu 70s se vzorkovací frekvencí 50ms nastavenou na zařízení Hydrotechnik.



Obr. 20 Schéma měřicího obvodu pro měření nárůstu tlaku v uzavřeném objemu

V laboratoři pneumatických zařízení na VŠB-TUO byl tento obvod poté sestaven z prvků jejichž podrobný popis je uveden v kapitole 3 Na takto sestaveném obvodu viz. Obr. 21 proběhlo měření těsnosti metodou nárůstu tlaku v uzavřeném objemu.



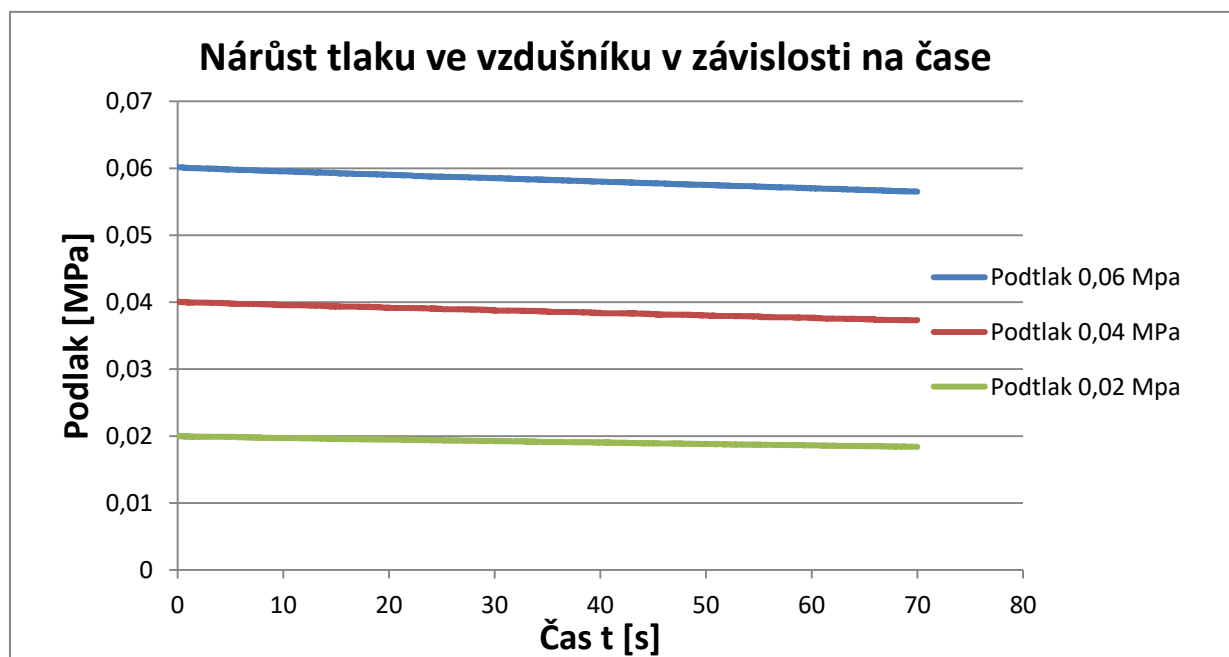
Obr. 21 Fotografie měřicího obvodu pro měření nárůstu tlaku v uzavřeném objemu

V následující tabulce č. 3. jsou uvedeny výsledky zprůměrovaných hodnot podtlaků na začátku a konci měření spolu s tlakovým nárůstem od začátku měření v [%] pro všechny hodnoty nastaveného konstantního podtlaku.

Tabulka č.3 Průměrný tlakový nárůst ve vzdušníku

Podtlak[MPa]	Průměrný podtlak na začátku měření [MPa]	Průměrný podtlak na konci měření [MPa]	Tlakový nárůst [%]
0,06	0,0601	0,0565	5,10
0,04	0,03962	0,03734	5,75
0,02	0,0197	0,01838	6,70

Objem vzdušníku s vedením = 2,046 dm³; velikost netěsnosti (1dm³/min)



Obr. 22 Graf průměrných hodnot pro všechny měření nárůstu tlaku

Graf průměrných hodnot nárůstu tlaku viz. Obr. 22 výše je vyobrazen v kladné poloose viditelný pokles křivek grafu je tedy brán jako tlakový nárůst od hodnot podtlaku převedených ze záporných do kladných hodnot. V grafu viz. Obr 22. je vidět průměrný nárůst tlaků ve vzdušníku za dobu zkoušky, způsobený vniknutím média do prostor vzdušníku s nižším než atmosférickým tlakem skrze škrticí ventil. Průměrný nárůst tlaku uvnitř vzdušníku od začátku do konce měření se pohyboval okolo 5,8 %. Kompletní naměřená a vypočítaná data jsou uvedena v CD příloze této práce ve složce "Měření".

3. Specifikace prvků měřících obvodů

Multi-systém M5050 Hydrotechnik

- Výkonné ruční přenosné zařízení
- Obsahuje: 4 analogové vstupy
2 frekvenční vstupy
- ISDS (automatickému rozpoznání snímačů)
- Výstupní analogový signál: 0 a 20 mA, 4 a 20 mA
nebo napěťový signál mezi 0 - 10V DC



Obr. 23 M5050 Hydrotechnik[18]

Snímač průtoku PFM 750-C8-E SMC

- Rozsah měřeného průtoku: 1 až 50 l/min
- Opakovatelnost $\pm 1\%$
- Doba odezvy volitelná: 50 ms, 0,5 s, 1 s.
- Média: Vzduch, dusík, argon, oxid uhličitý
- Pracovní tlak – 100 až 750 kPa



Obr. 24 PFM 750-C8-E[14]

Vakuový ejektor VDA 1/8 14015

- Pracovní tlak: 1,5 – 10 bar
- Provozní teplota: -20 °C až 80 °C
- Závit přípojného portu 1/8
- Max. hodnota vakuu - 80 %
- Výrobce: Festo s.r.o.
- Příslušenství: Tlumič hluku, nástrčná spojka



Obr. 25 VDA 1/8 14015[15]

Mechanický rozvaděč EVZM550 SMC

- 5 cestný / 2 polohový rozvaděč pro stlačený vzduch a inertní plyny
- Modulární provedení
- Závit přípojného portu G 1/8
- Pracovní tlak: 0,15 - 0,7 MPa
- Jmenovitý průtok: 590 l/min



Obr. 26 EVZM550 SMC[16]

Snímač tlaku HySense PR 300 Hydrotechnik

- Princip měření: piezoelektrický
- Měřicí rozsah (-1 až 6 bar)
- křemíkový čip v obalu z nerezové oceli
- Výstupní signál: 0 .. 20 mA / 4 .. 20 mA
- měřicí konektor: 6 pólový M16 x 0,75
- Mechanický měřicí konektor ISO 228
- vnitřní závit G 1/4
- Těsnění FKM

**Obr. 27 HySense PR300[17]**Redukční ventil VPPE-3-1-1/8-10-010-E1

- Třicestný proporcionální regulátor tlaku
- Princip: membránový regulátor
- Rozsah regulovaného tlaku 0,02 - 10 bar
- Výstupní signál: 0 .. 20 mA / 4 .. 20 mA
- Připojení G1/8
- Průtok 310-1250 l/min)
- Led displej

**Obr. 28 VPPE-3-1-1/8-10-010-E1[19]**Převodník teplota – napětí STU – Ni IP65

- Krytí svorkovnice IP 65 dle ČSN EN 60 529
- Teplota okolí -30 °C až 80 °C
- Chyba měření < 0,6 % z rozsahu, minimálně 0,5 °C
- Zatěžovací odpor $R_z > 50 \text{ k}\Omega$
- Odběr proudu < 8 mA
- Výstupní napětí při přerušení čidla > 14 V
- Měřicí rozsah -30 až 400 °C

**Obr. 29 STU – Ni IP65**Škrticí ventil Bosch rexroth 0 821 201 004

- Připojení G1/8
- Velikost škrticího prostoru 2mm
- Média: Vzduch, dusík, oxid uhličitý

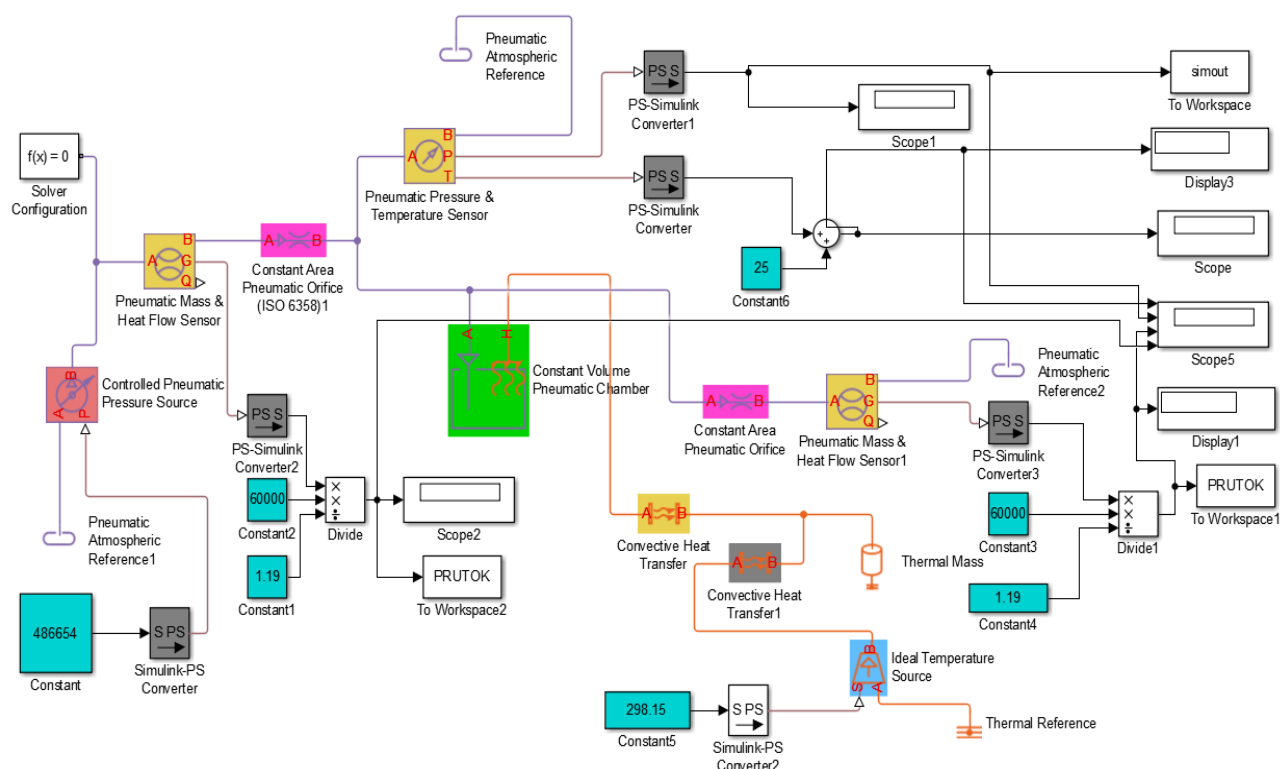
**▪ Obr 30 Škrticí ventil**

Vzdušník se škrticím ventilem

- Objem 2l,
- Připojení G1/8
- Připojen škrticí ventil 0 821 201 004

**Obr. 31 Vzdušník****4. Tvorba matematických modelů**

Matematický model unikajícího průtoku, poklesu i nárůstu tlaku v uzavřeném objemu byly vytvořeny pomocí software Matlab Simulink z prvků (bloků) knihovny Simscape. K výpočtu byl použit řešitel Ode 15s (Stiff/ NDF).

4.1 Matematický model unikajícího průtoku**Obr. 32 Simulační model unikajícího průtoku**

Kompletní model je součástí CD přílohy této práce s názvem "Modelprutoku.slx"

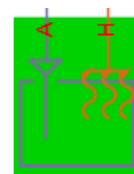
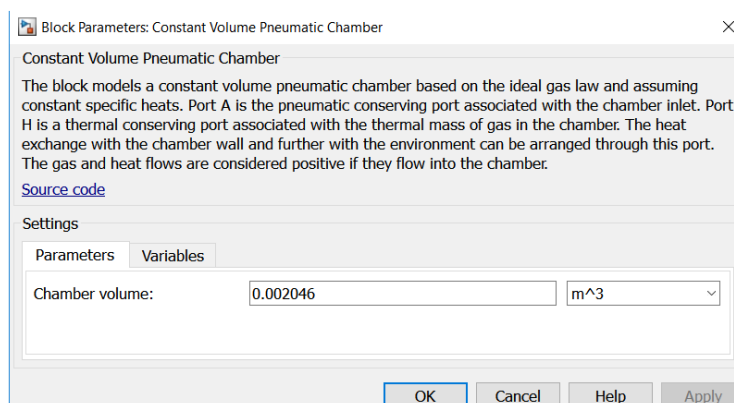
Obvod na Obr 32 byl složen z následujících bloků knihovny Matlab Simulink Simscape :

- Ideální zdroj tlaku (Controlled Pneumatic Pressure Source)
- Snímač průtoku (Pneumatic Mass & Heat Flow Sensor)
- Clona ISO 6358 (Constant Area Pneumatic Orifice ISO 6358)
- Vzdušník (Constant Volume Pneumatic Chamber)
- Snímač tlaku a teploty (Pneumatic Pressure & Temperature Sensor)
- P-SS Převodník (PS-Simulink Converter)
- Blok Scope
- Blok Workspace
- Blok Pneumatic Atmospheric reference
- Blok Thermal Mass
- Bloky matematických úprav (Divide, Sum)
- Blok Ideal Temperature Source
- P-SS Převodník (PS-Simulink Converter)
- S-PS Převodník (SP-Simulink Converter)
- Blok Solver Configuration“
- Blok Convective Heat Transfer

Nastavení bloků modelu unikajícího průtoku

Blok vzdušníku (Constant Volume Pneumatic Chamber)

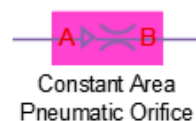
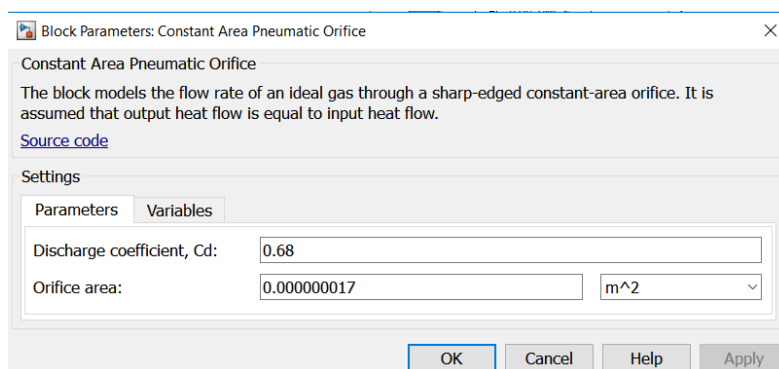
Blok obsahuje 2 porty A, H .Port A slouží jako vstupní zatímco port H slouží k simulaci tepelné výměny a přestupu tepla s okolím. K portu H byl připojen obvod k simulaci výměny tepla mezi vzdušníkem a okolím. Zadaný objem vzdušníku odpovídá hodnotě měření $V = 2,046 \text{ dm}^3$.



Obr. 33 Constant Volume Pneumatic Chamber

Blok škrticího ventilu - netěsnost (Constant Area Pneumatic orifice)

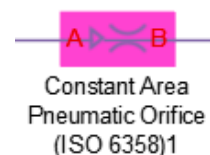
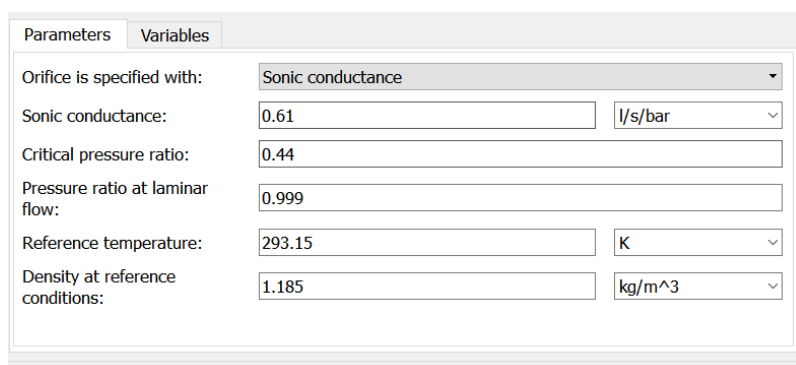
Škrticí ventil simulující netěsnost vzdušníku byl zadán 2 parametry. Koeficientem vypouštění $C_d [-]$ a plochou ventilu $[m^2]$ Nastavení bloku bylo konstantní pro všechny 3 simulované obvody.



Obr. 34 Constant Area Pneumatic orifice

Blok 5/2 rozvaděče (Constant Area Pneumatic Orifice ISO 6358)

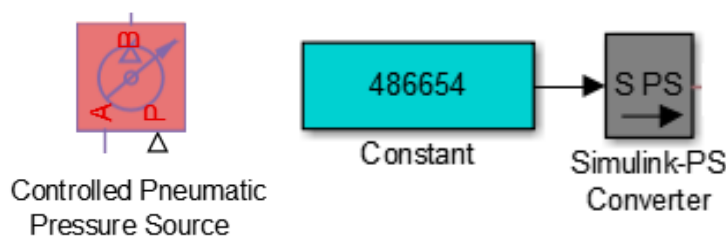
K simulaci 5/2 rozvaděče jsem použil škrticí ventil ISO 6358. Nastavení tohoto bloku bylo převedeno na základě katalogových hodnot uváděného výrobcem ventilu SMC s.r.o.



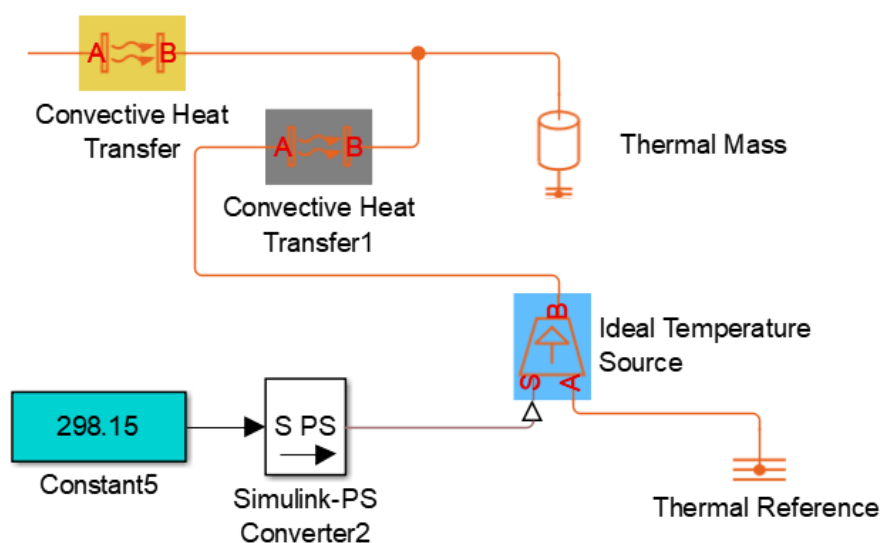
Obr. 35 Constant Area Pneumatic Orifice ISO 6358

Blok konstantního zdroje tlaku (Controlled Pneumatic Pressure Source)

Blok simulující konstantní zdroj tlaku byl nastavován na hodnoty konstantního tlaku pro všechny měření. Hodnoty tlaku byly zadávány skrze konstantu a SP-S převodník.



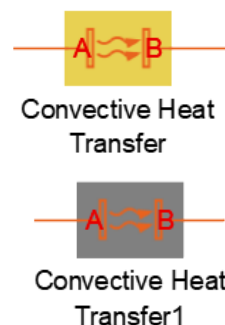
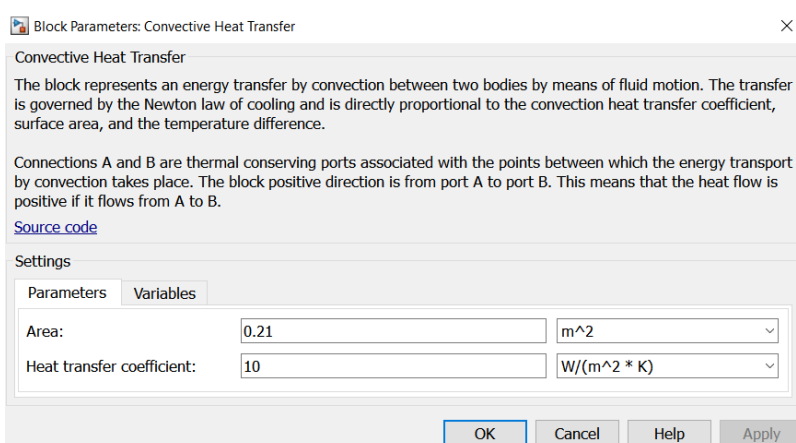
Obr. 36 Controlled Pneumatic Pressure Source

Obvod k simulaci výměny tepla mezi vzdušníkem a okolním prostředím.**Obr. 37** Obvod k simulaci výměny tepla mezi vzdušníkem a okolním prostředím

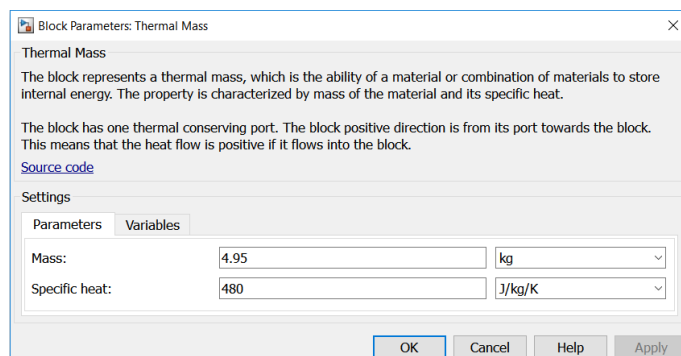
Obvod k simulaci výměny tepla mezi vzdušníkem a okolním prostředím byl složen z následujících bloků: Skladba obvodu a nastavení bylo provedeneno na základě literatury [10].

Convective Heat Transfer (žlutá barva) zajišťuje přestup tepla z okolního prostředí na stěnu vzdušníku. Byl zadán 2 parametry, celkovou teplosměrnou plochou a parametrem součinitele přestupu tepla

Convective Heat Transfer (šedá barva) zajišťuje přestup tepla ze stěny vzdušníku do okolí.

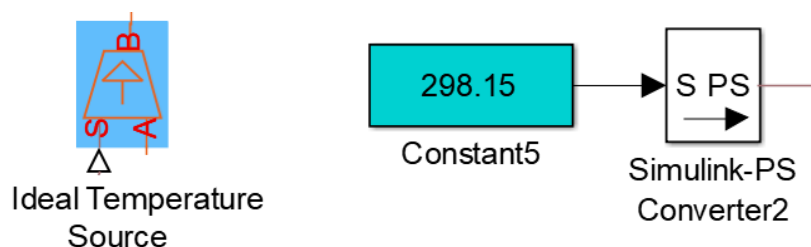
**Obr. 38** Convective Heat Transfer

Thermal Mass představuje blok pro tepelnou hmotu odrážející schopnost materiálu k ukládání vnitřní energie. Je specifikován hmotností a měrnou tepelnou kapacitou.



Obr. 39 Thermal mass

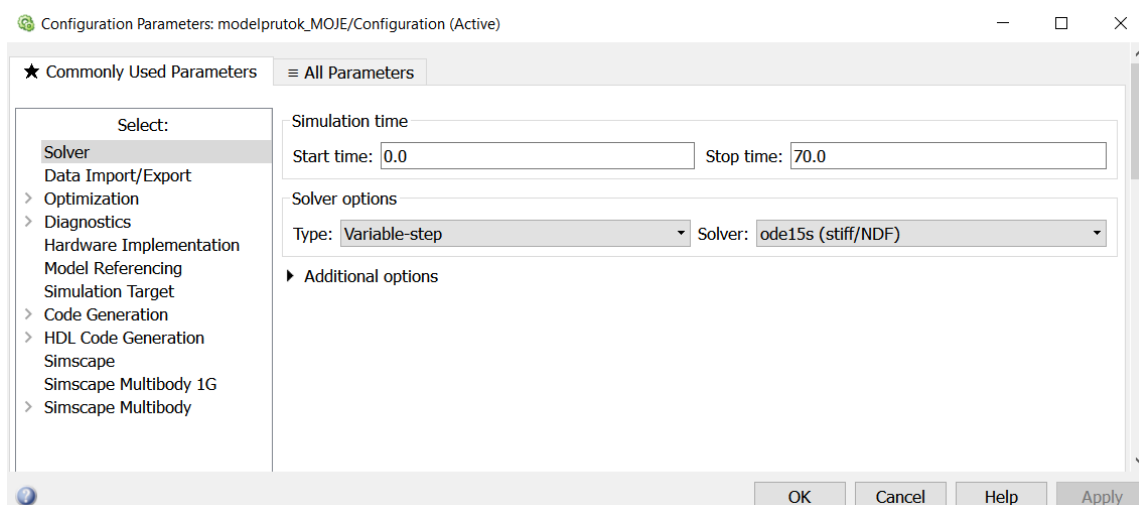
Ideal Temperature Source (Modrá barva) představuje ideální zdroj tepelné energie. Nastavován na hodnoty teploty měření, skrze konstantu a S-PS převodník signálu.



Obr. 40 Ideal Temperature Source

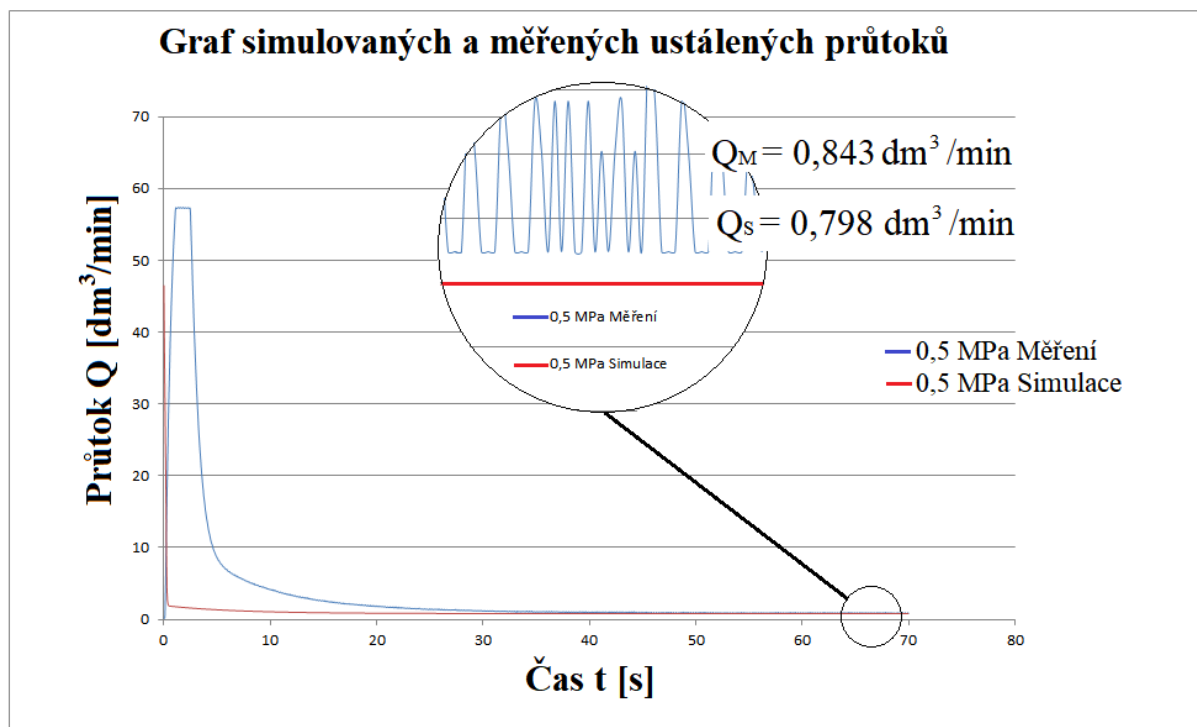
Nastavení výpočtového řešitele

K výpočtu byl použit řešitel Ode 15s (Stiff/ NDF).



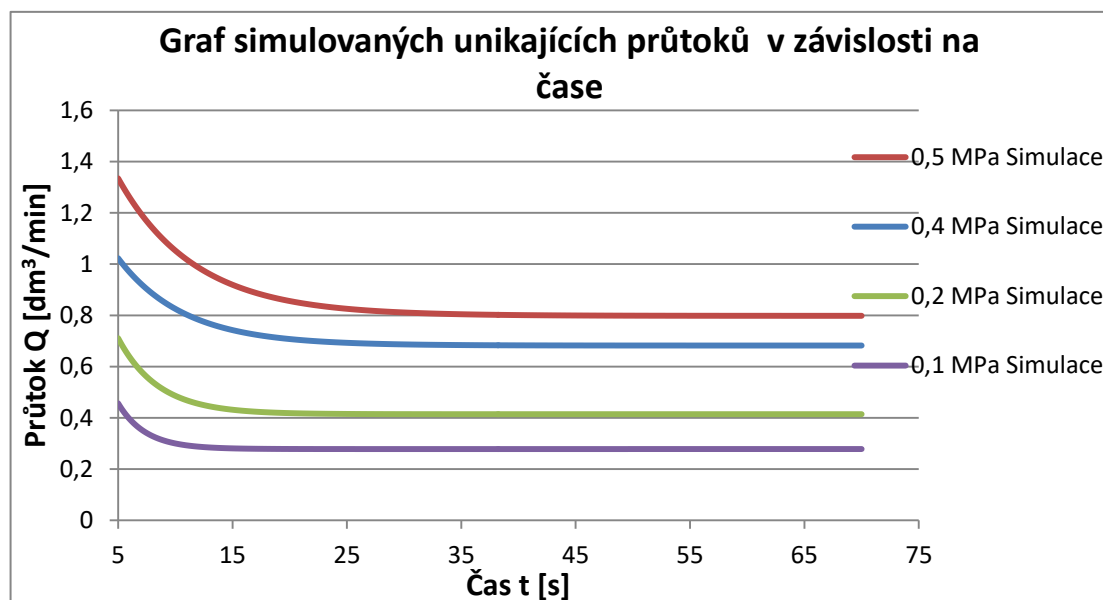
Obr. 41 Nastavení výpočtového řešitele

Grafické porovnání průběhu unikajícího vzduchu naměřených hodnot a simulace při tlaku 0,5 MPa.



Obr. 42 Graf průběhu unikajícího vzduchu simulace a měření pro 0,5 MPa

Výsledky matematického modelu unikajícího průtoku pro jednotlivé tlaky



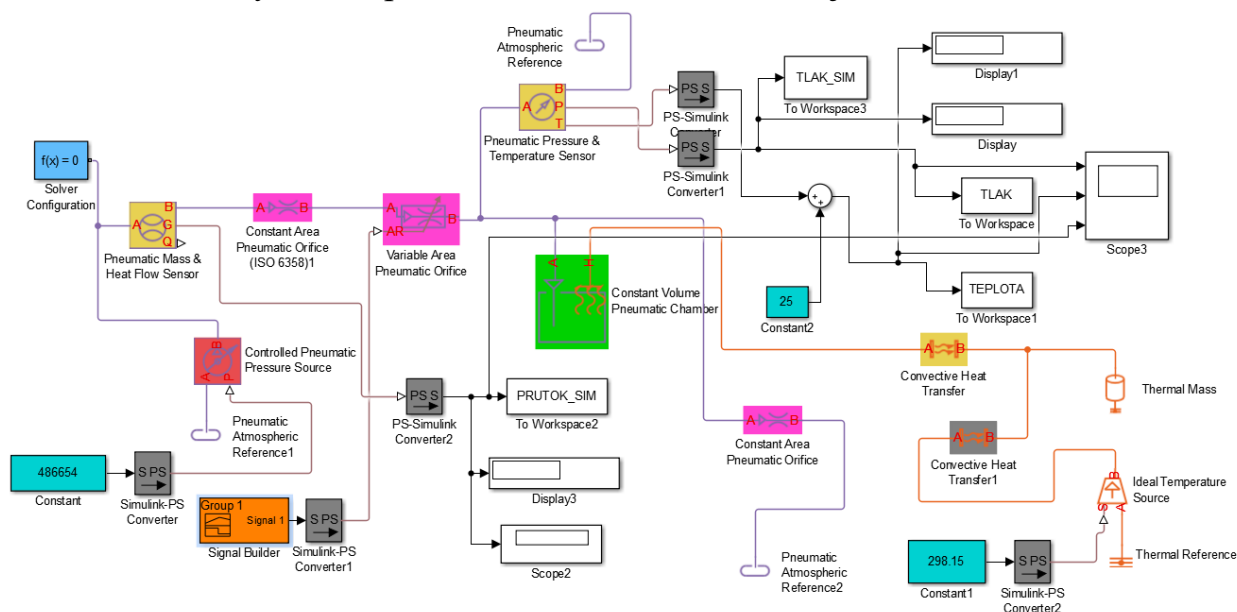
Obr. 43 Graf simulací unikajícího průtoku

Z důvodu zobrazení velikosti ustáleného průtoku byl graf vykreslen až po 5 sekundách simulace. Kompletní naměřená a vypočítaná data jsou uvedena v CD příloze této práce ve složce "Měření". Kompletní data jsou součástí CD přílohy této práce s názvem "Měření"

Tabulka č.4 ustálený průtok simulace

Nastavený tlak [MPa]	0,103	0,203	0,401	0,486
Ustálený průtok simulace [dm ³ /min]	0,278	0,414	0,682	0,798

4.2 Matematický model poklesu tlaku v uzavřeném objemu

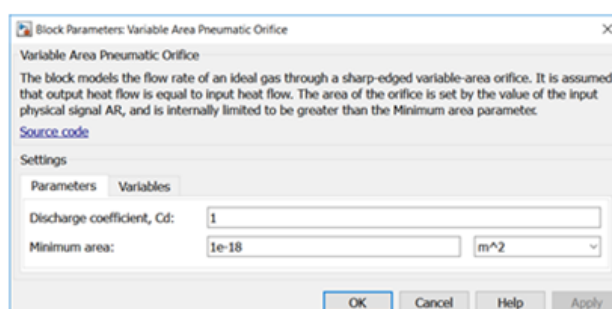


Obr. 44 Simulační model poklesu tlaku v uzavřeném objemu

Simulační model Obr. 44 byl sestaven ze stejných bloků, jako simulační model viz kapitola 4.1. Nastavení jednotlivých bloků bylo taktéž totožné s kapitolou 4.1, jen s rozdílem že byl do obvodu přidán škrticí ventil simulující uzavírací ventil, pomocí něhož se uzavírala přívod tlaku do vzdušníku. Kompletní model je součástí CD přílohy této práce s názvem "Modeltlak.slx"

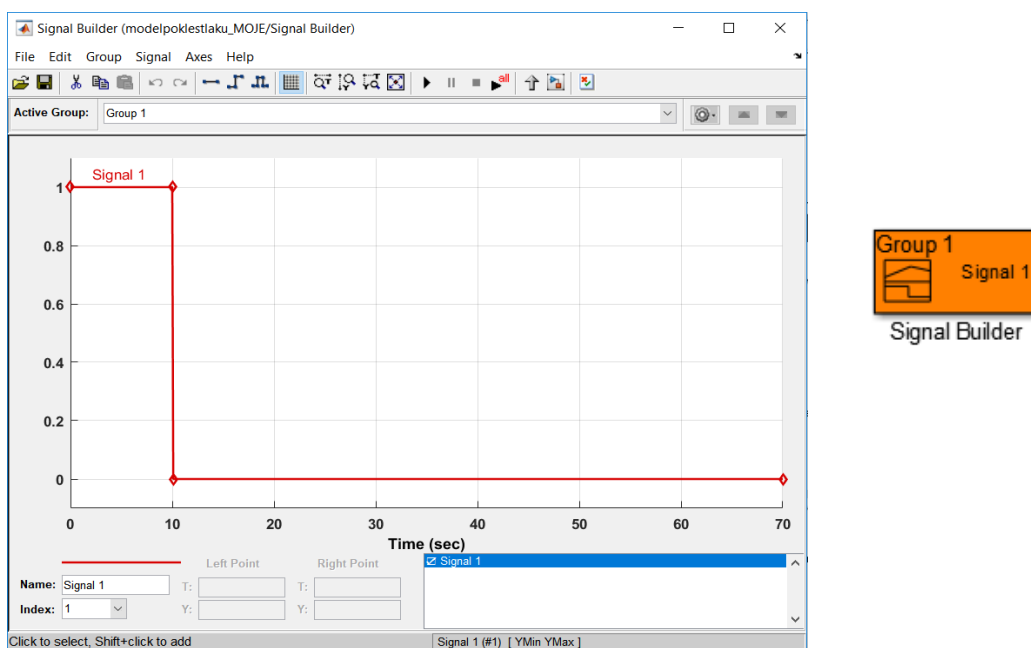
Uzavírací ventil (Variable Area Pneumatic Orifice)

Jelikož knihovna Matlab Simulink Simscape neobsahuje uzavírací ventil, bylo nutné použít škrticí ventil u kterého byla zadána plocha tak malá, aby neovlivnila výsledek testu.



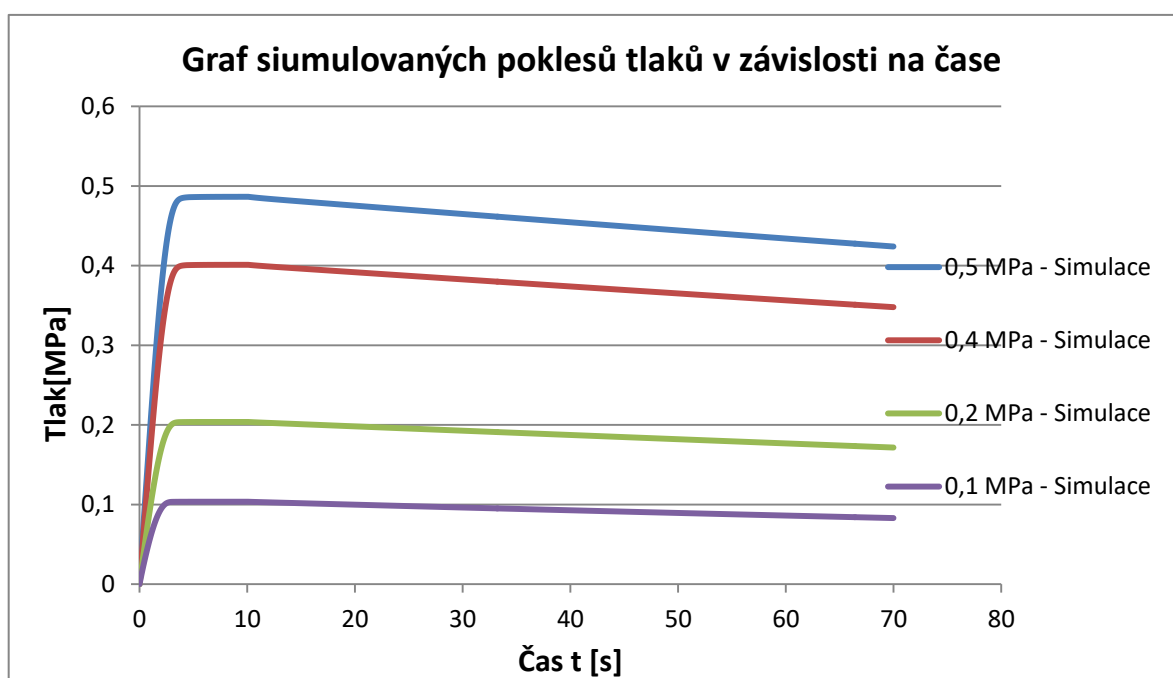
Obr. 45 Variable Area Pneumatic Orifice

Uzavření škrticího ventilu po 10s bylo docíleno skrze blok Signal builder ve kterém byl nastaven signál uzavření viz. Obr 46.



Obr.46 Signal builder, signál uzavření ventilu

Výsledný graf simulace poklesu tlaku v uzavřeném objemu



Obr. 47 Graf simulace poklesu tlaku v uzavřeném objemu

V grafu viz Obr. 47 je vidět průběh tlaku simulovaného obvodu unikající skrze škrticí ventil. Průměrný pokles tlaků ve vzdušníku se pohyboval okolo hodnoty 12%.

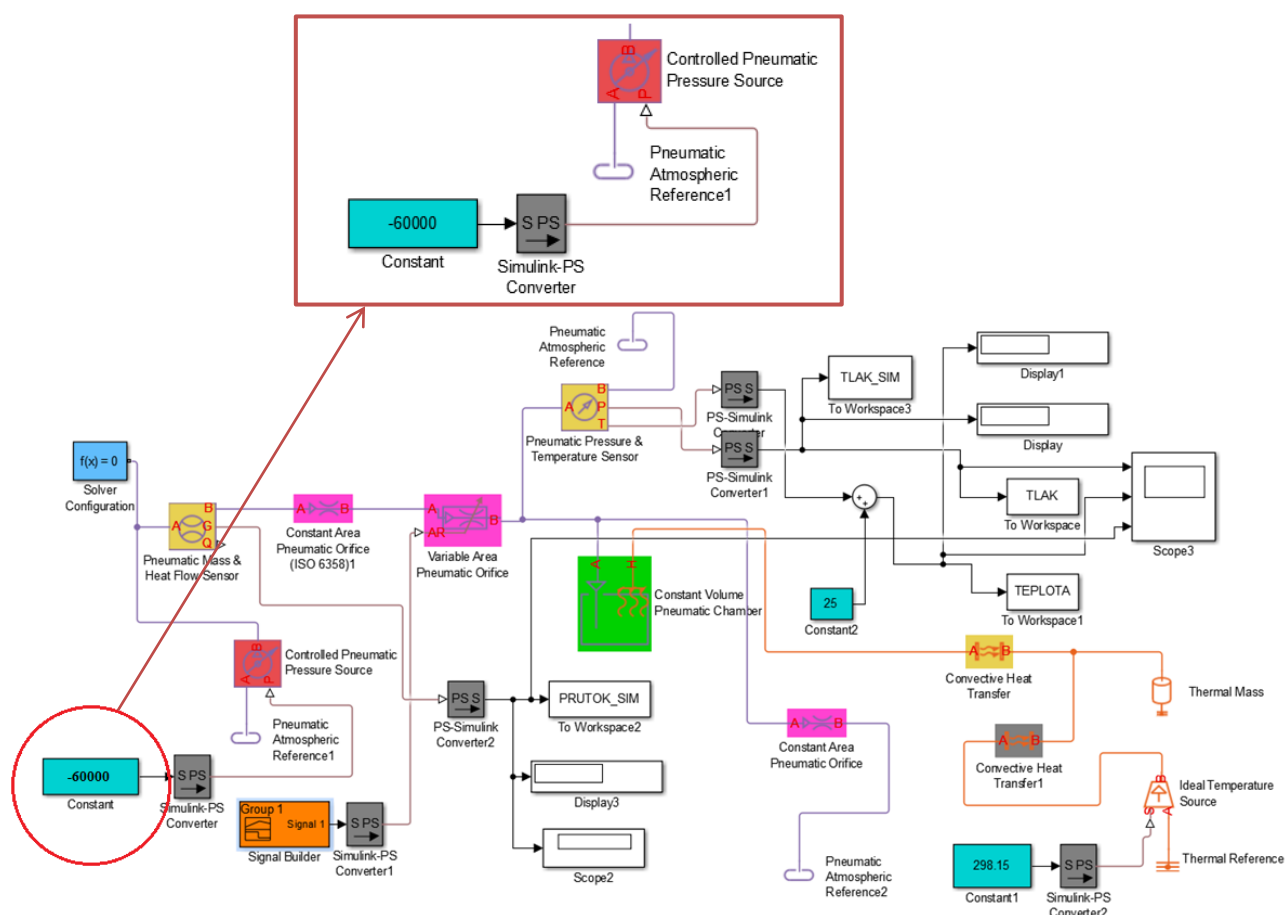
Průběh simulovaných tlaků i hodnota poklesu tlaku za dobu zkoušení se od hodnot měření lišila v rozmezí 2-3%. Kompletní data jsou součástí CD přílohy této práce s názvem "Měření"

Tabulka č.5 Tlakový pokles simulace

Tlak začátek simulace [MPa]	Tlak konec simulace [MPa]	Tlak konec měření [MPa]	Tlakový pokles simulace [%]
0,486	0,4202	0,4202	13,60
0,401	0,3500	0,3500	12,72
0,203	0,1804	0,1804	11,41
0,103	0,0900	0,0900	11,27

4.3 Matematický model nárůstu tlaku v uzavřeném objemu

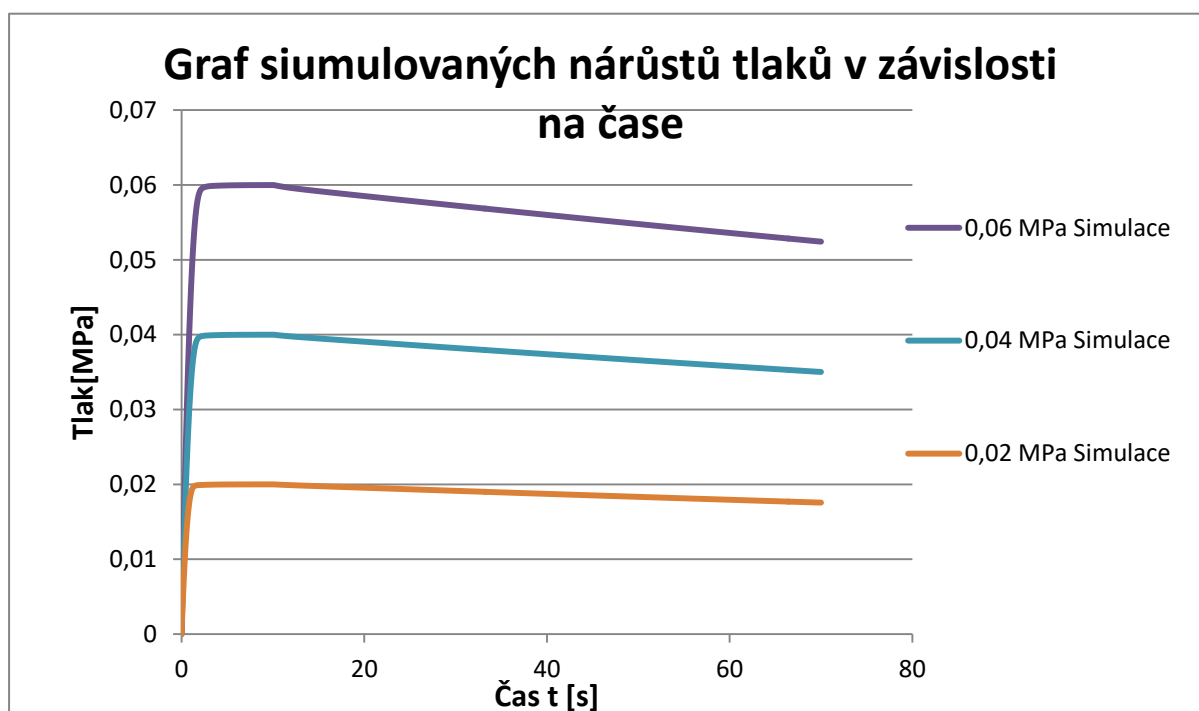
Obvod pro tuto metodu byl totožný s obvodem pro simulaci poklesu tlaku v uzavřeném obvodu viz. kapitola 4.2. Lišil se pouze tlak zadáný do bloku simulující konstantní zdroj tlaku (červená barva) skrze konstantu (modrá barva) a SP-S převodník.(šedá barva) viz.Obr 48.



Obr. 48 Matematický model nárůstu tlaku v uzavřeném objemu

Kompletní model je součástí CD přílohy této práce s názvem "Modelpodtlak.slx"

Výsledný graf simulace nárůstu tlaku v uzavřeném objemu



Obr. 49 Graf simulace nárůstu tlaku v uzavřeném objemu

Graf průměrných hodnot nárůstu tlaku viz. Obr. 49 výše je vyobrazen v kladné poloose viditelný pokles křivek grafu je tedy brán jako tlakový nárůst od hodnot podtlaku převedených ze záporných do kladných hodnot. Kompletní data jsou součástí CD přílohy této práce s názvem "Měření"

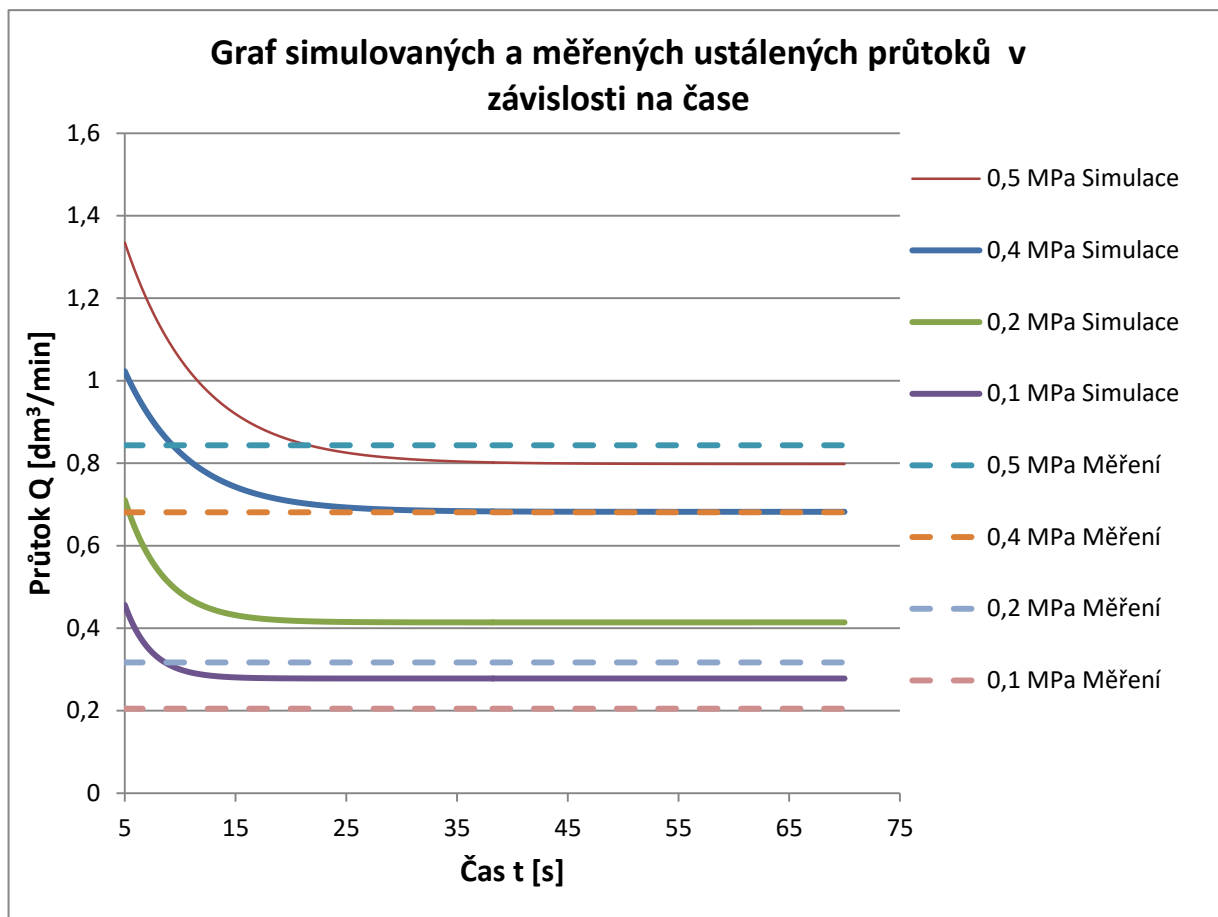
Tabulka č.6 Průměrný tlakový nárůst simulace

Tlak na začátku simulace [MPa]	Tlak na konci simulace [MPa]	Tlakový nárůst simulace [%]
0,0601	0,0524	12,76
0,0396	0,0350	11,61
0,0197	0,0176	10,85

5. Porovnání výsledků měření a matematického modelu

V následující kapitole je popsáno porovnání hodnot měření a simulace pro všechny 3 metody měření těsnosti. Dále je popsáno porovnání všech metod simulace i měření z hlediska výsledků, spolehlivosti skladby zařízení a doby zkoušení.

5.1 Porovnání výsledků unikajícího průtoku



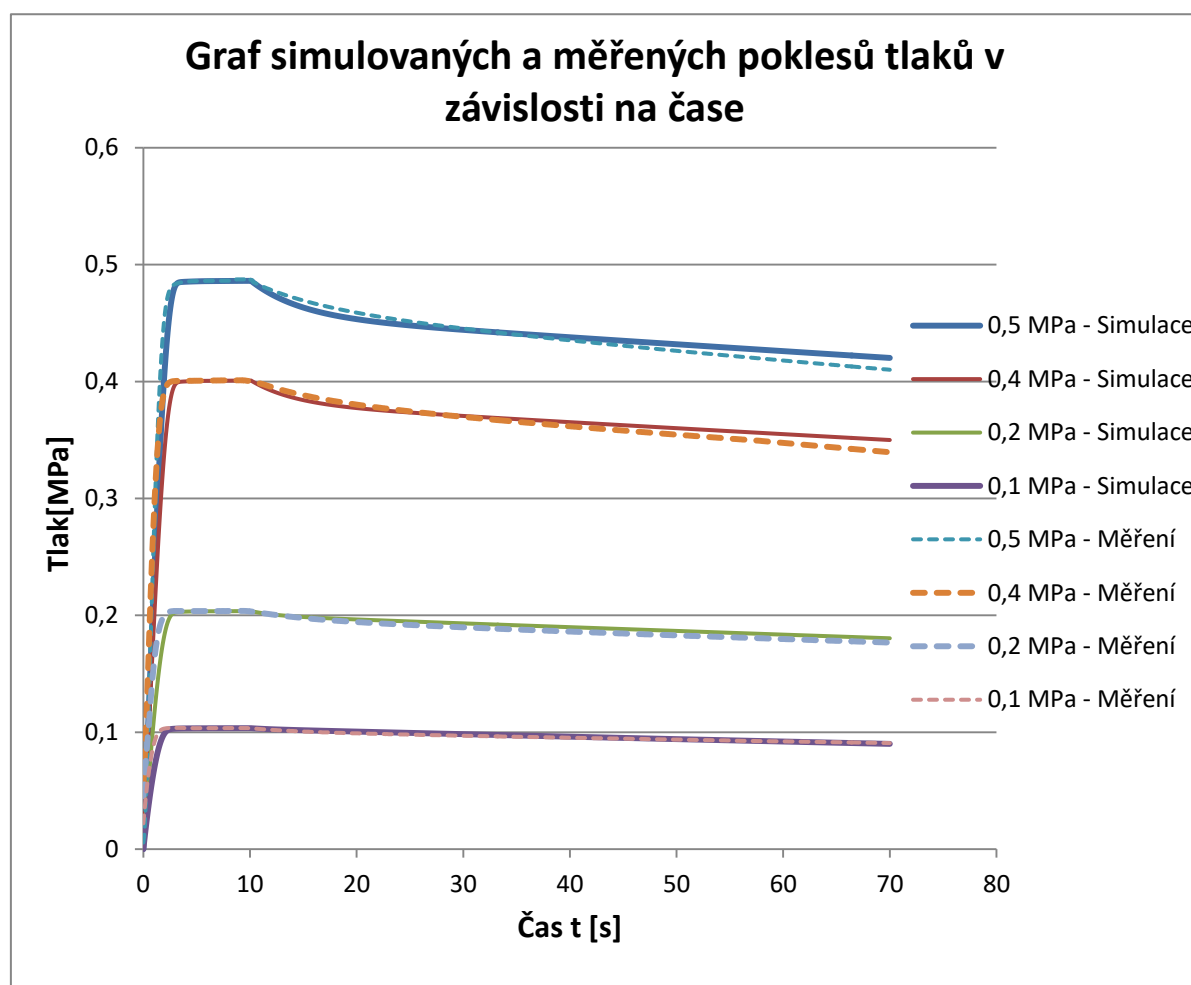
Obr. 50 Graf simulace a měření unikajícího průtoku

V grafu viz Obr. 50 je vidět porovnání hodnot průběhu ustáleného průtoku měření a simulace pro metodu měření unikajícího průtoku. Výsledný simulovaný průběh průtoků ve vzdušníku se od měření lišil v rozmezí od 0,2 do 10 % viz tabulka č.7. ustálený průtok simulace Kompletní data jsou součástí CD přílohy této práce s názvem "Měření"

Tabulka č.7 ustálený průtok simulace

Nastavený tlak [MPa]	Ustálený průtok měření [dm^3/min]	Ustálený průtok Simulace [dm^3/min]	Rozdíl měření a simulace [%]
0,4865	0,8435	0,798	5,37
0,4010	0,681	0,682	0,17
0,2037	0,371	0,414	10,41
0,1035	0,252	0,278	9,37

5.2 Porovnání výsledků poklesu tlaku v uzavřeném objemu.



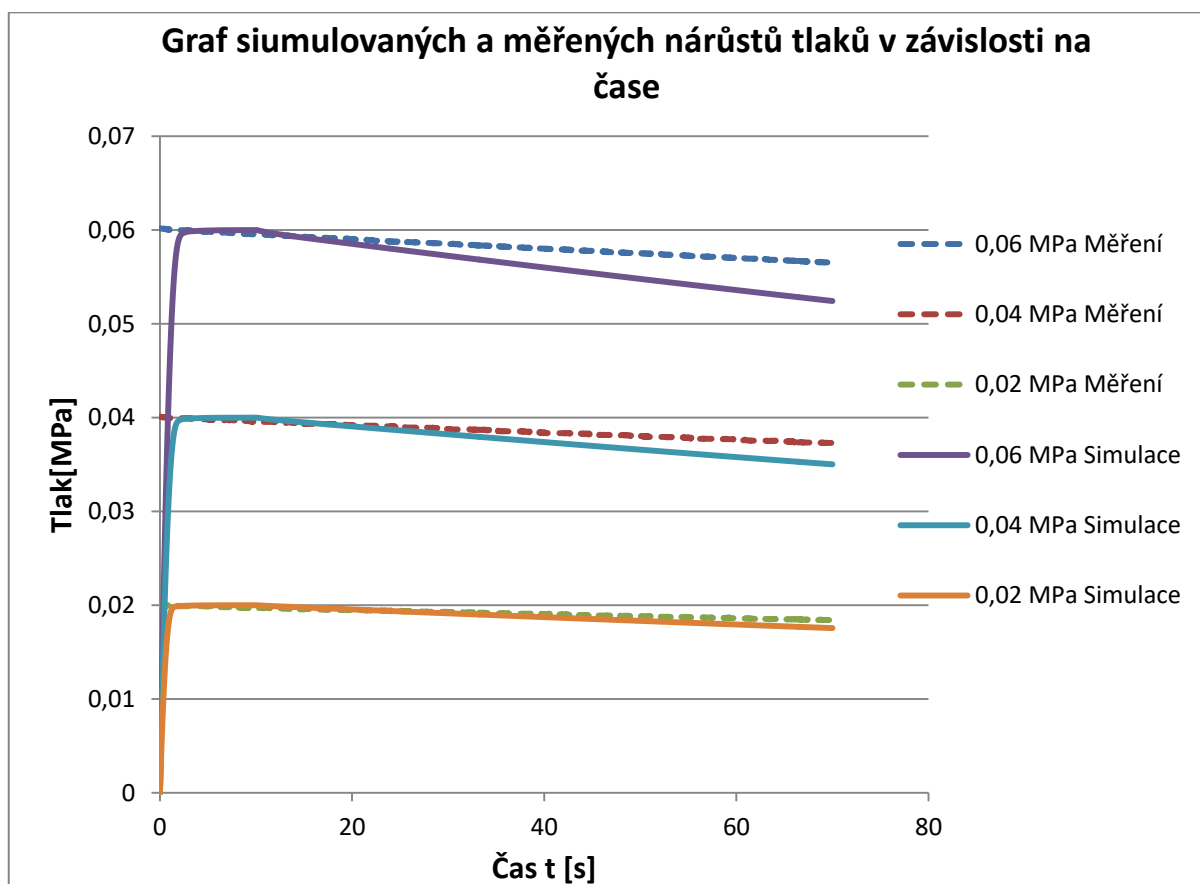
Obr. 51 Graf simulace a měření poklesu tlaku v uzavřeném objemu

V grafu viz Obr. 51 je vidět porovnání hodnot průběhu tlaku měření a simulace pro metodu poklesu tlaku v uzavřeném objemu. Výsledný simulovaný průběh tlaku ve vzdušníku se od měření lišil v rozmezí 1-2 % viz tabulka č.8. Kompletní data jsou součástí CD přílohy této práce s názvem "Měření"

Tabulka č.8 porovnání hodnot měření a simulace

Nastavený tlak [MPa]	Tlakový pokles měření [%]	Tlakový pokles simulace [%]	Rozdíl simulace a měření [%]
0,486	15,63	13,6088	2,02
0,401	14,71	12,7233	1,98
0,203	13,28	11,4176	1,86
0,103	12,39	11,2711	1,11

5.3 Porovnání výsledků nárůstu tlaku v uzavřeném objemu



Obr. 52 Graf simulace a měření nárůstu tlaku v uzavřeném objemu

V grafu viz Obr. 52 je vidět porovnání hodnot průběhu tlaku měření a simulace pro metodu nárůstu tlaku v uzavřeném objemu. Výsledný simulovaný průběh tlaku ve vzdušníku se od měření lišil v rozmezí 4-7 % viz tabulka č. 9. Kompletní data jsou součástí CD přílohy této práce s názvem "Měření"

Tabulka č.9 Nárůst tlaku ve vzdušníku simulace i měření

Nastavený tlak [MPa]	Tlakový nárůst měření [%]	Tlakový nárůst simulace [%]	Rozdíl měření a simulace [%]
0,06	5,10	12,76	7,66
0,04	5,75	11,61	5,86
0,02	6,7	10,85	4,15

6. Porovnání zkoušek těsnosti

V této kapitole jsou uvedeny porovnání zkoušek těsnosti z hlediska skladby zařízení, doby zkoušení, a spolehlivosti měření.

6.1 Porovnání zkoušek těsnosti - skladba zařízení

Pro všechny tři vybrané metody byly sestaveny 3 různé měřicí obvody. Pomocí přidání či odebrání určitého prvku z obvodu. např. obvod pro testování těsnosti pomocí metody poklesu tlaku a metody testování těsnosti pomocí metody nárůstu tlaku v uzavřeném objemu byl sestaven z totožných prvků, jen s rozdílem že při použití metody nárůstu tlaku byl do obvodu přidán vakuový ejektor, pomocí kterého se místo přetlaku v prvku vyvolal podtlak. Doba mezi změnou testovací metody a tudíž i testovacího obvodu se zkrátila na minimum. Je tak možno provést testování těsnosti jednoho prvku pomocí dvou odlišných metod při použití jednoho měřicího standu.

6.2 Porovnání zkoušek těsnosti - doba zkoušení

Doba zkoušení u všech 3 výše zmíněných metod trvala po dobu 70s. Nicméně u metody testování těsnosti pomocí průtokového testu je z vyhodnocení této metody viz kapitola 2.2 zřejmé, že k ustálení hodnot všech testovaných průtoků při všech tlacích došlo již do doby 40s. S tímto poznatkem by se při dalším testování těsnosti prvku pomocí této metody, mohla doba zkoušení zkrátit téměř na polovinu se zachováním hodnověrnosti výsledku testu. U metod poklesu tlaku a poklesu podtlaku v uzavřeném objemu byla doba zkoušení totožná, s tím rozdílem že při použití metody poklesu tlaku bylo prvních 10s testu věnováno tlakování vzdušníku na ustálenou hodnotu přetlaku a samotný test trval po dobu 60s. Při testování těsnosti pomocí metody poklesu podtlaku byl vzdušník odvzdušňován po dobu, než se dosáhlo ustálené hodnoty podtlaku a samotné měření poté probíhalo po celou dobu 70s. Čím delší je doba zkoušení u těchto metod tím větší je i pokles nebo nárůst tlaku v uzavřeném objemu. Delší zkušební doby umožňují více citlivé měření, nicméně ale mohou být časově náročné, například u netěsnosti menších rozměrů. Taktéž čím vyšší je tlak v prvku, tím rychleji lze zjistit, zda je nebo není přítomna netěsnost.

K výpočtu hodnot unikajícího průtoku u metody poklesu tlaku byl použit vzorec (7) z teoretické části práce viz. kapitola.1.6. Průtoky uvedené v tabulce jsou vypočítány pro tři různé časové intervaly 10s, 30s a 50s. Je poměrně zajímavé, že i po 50 sekundách je

vypočtený průtok vyšší, než ustálený průtok u průtokové metody a to i přesto, že u výpočtu docházelo k postupnému poklesu tlaku.

Tabulka č.10 Výpočet unikajícího průtoku

Čas měření/ výpočtu	10s	30s	50s	10s	30s	50s
Tlak měření [Mpa]	Výpočet Q [dm ³ /min]	Výpočet Q [dm ³ /min]	Výpočet Q [dm ³ /min]	Měřený Q [dm ³ /min]	Měřený Q [dm ³ /min]	Měřený Q [dm ³ /min]
0,4865	3,2796	2,0363	1,6433	1,8893	1,3540	0,8133
0,4010	2,3786	1,5311	1,2602	1,8050	1,3160	0,8680
0,2037	1,0207	0,6655	0,5537	0,7120	0,4503	0,3170
0,1035	0,5175	0,3247	0,2711	0,2983	0,2266	0,2067

6.3 Porovnání zkoušek těsnosti - spolehlivost

Spolehlivost zvolených měřících metod závisí na více faktorech např. změnách teploty okolního prostředí, mechanických deformacích zkoušeného prvku, samotné nepřesnosti měřících členů i samotném testovacím čase a vzorkovací frekvenci zaznamenávání.

Nejistota zobrazení výsledků snímačů

Snímač průtoku PFM 750-C8-E SMC

Linearita (při použití se suchým vzduchem)

- Přesnost zobrazení: $\pm 3\%$ v celém rozsahu při použití se suchým vzduchem
- Přesnost analogového výstupu: $\pm 5\%$ v celém rozsahu.

Opakovatelnost (při použití se suchým vzduchem)

- Přesnost opakovatelnosti je $\pm 1\%$ v celém rozsahu. při použití se suchým vzduchem. při výměně potrubí za vedení stejné velikosti. Přesnost se může lišit v rozsahu 2-3% pokud byla použita nesprávná velikost vedení nebo záměna rovnoběžného vedení za úhlové (koleno)
- Přesnost analogového výstupu: $\pm 3\%$ v celém rozsahu

Teplotní charakteristiky (při použití se suchým vzduchem)

- $\pm 2\%$ v celém rozsahu, v rozmezí teploty (15 až 35 ° C)
- $\pm 5\%$ v celém rozsahu, v rozmezí teploty (0 až 50 ° C)

Tlakové charakteristiky (při použití se suchým vzduchem)

- Přesnost tlakových charakteristik $\pm 5\%$ v celém rozsahu. (pro jmenovitý tlak 0,35 MPa)

Vynulování hodnot (Zero clear function)

- Umožňuje uživateli nastavit naměřenou hodnotu průtoku na nulu.
- Rozsah nastavení je $\pm 7\%$ v celém rozsahu původního výrobního nastavení

Snímač tlaku HySense PR 300 Hydrotechnik**Linearita**

- Přesnost zobrazení: $\pm 3\%$ v celém rozsahu
- Přesnost analogového výstupu: $\pm 5\%$ v celém rozsahu.
- Nelinearita $> 0.1 \text{ MPa} < \pm 0.25\%$ konečné hodnoty

Opakovatelnost

- Přesnost opakovatelnosti je $\pm 0,25\%$ konečné hodnoty v celém rozsahu
- Přesnost analogového výstupu: $\pm 3\%$ v celém rozsahu

Hystereze

- $> 0,1 \text{ MPa} < \pm 0,25\%$ konečné hodnoty

Vynulování hodnot (Zero clear function)

- Umožňuje uživateli nastavit naměřenou hodnotu průtoku na nulu.
- Rozsah nastavení je $\pm 5\%$ v celém rozsahu původního výrobního nastavení

Celková chyba měření

- při +22 ° C (teplota okolí) $\pm 0,2\%$
- při -20 + 80 ° C (teplota okolí) $< \pm 3\%$

7. Určení nejistot měření

Pokud chápeme chybu měření jako odchylku konkrétně naměřené hodnoty od správné hodnoty měřené veličiny, je zřejmé, že ji nelze stanovit, protože principiálně nelze stanovit správnou hodnotu. Proto se místo pojmu chyby měření zavádí pojem nejistoty měření jako veličiny, které charakterizuje určité toleranční pásmo kolem odhadnuté nejpravděpodobnější správné hodnoty měřené veličiny [11] [12] [13]

7.1 Určení nejistot při měření tlaku

Průměrný tlak
$$p_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p_i) \quad (10)$$

Kde: n – Počet měření

p_i – Naměřený tlak

p_p – Průměrný tlak

Standardní nejistota typu A
$$u_A(p) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (p_i - p_p)^2} \quad (11)$$

Kde: u_a – Standardní nejistota typu A

n – Počet měření [-]

p_i – Naměřený tlak [bar]

p_p – Průměrný tlak [bar]

Interval možného správného údaje
$$U_{MAX} = \frac{\delta_1}{100} U_x + \frac{\delta_2}{100} U_R \quad (12)$$

Kde: U_{MAX} – Interval možného správného údaje [bar]

U_X – Rozsah naměřené průměrné hodnoty [bar]

U_R – Rozsah měřicího přístroje [bar]

δ_1 – Chyba měření rozsahu U_X [%]

δ_2 – Chyba měření rozsahu U_R [%]

Standardní nejistota typu B

$$u_B(p) = \frac{U_{max}}{\sqrt{3}} \quad (13)$$

Kde: U_{MAX} – [bar] u_B - Standardní nejistota typu B [bar]

Kombinovaná standardní nejistota

$$u_c(p) = \sqrt{u_A^2(p) + u_B^2(p)} \quad (14)$$

Kde: u_A - Standardní nejistota typu A [bar] u_B - Standardní nejistota typu B [bar] u_c - Kombinovaná standardní nejistota [bar]

Rozšířená nejistota s koeficientem rozšíření

$$U(p) = k_r \cdot u_c(p) \quad (15)$$

Kde: $U(p_p)$ - Rozšířená nejistota [bar] k_r – Koeficient rozšíření $k_r = 2$ [-] u_c - Kombinovaná standardní nejistota [bar]

Tabulka č.11 Výsledné hodnoty nejistot při měření tlaku

P_p [bar]	U_a [bar]	U_{max}	U_b	U_c	$U_{(p)}$
4,8578	0,036664	0,026143	0,015093	0,039649	0,079298
4,0107	0,00098	0,024027	0,013872	0,013906	0,027813
2,0371	0,002608	0,019093	0,011023	0,011327	0,022655
1,0351	0,001166	0,016589	0,009578	0,009648	0,019297

Zápis výsledku měření

$$P = (p_p \pm U(p)) = (4,8578 \pm 0,079298) \text{ bar}$$

8. Závěr

Práce se zabývá porovnáním zkoušek těsnosti předního světlu osobního automobilu. Jelikož nebyl k měření dispozici světlomet, bylo využito 2l vzdušníku se simulovanou netěsností. První kapitola této práce je věnována rozboru různých druhů metod k detekci a testování netěsnosti. Jsou zde zmíněny základní metody jako je například bublinkový test ponořením pod vodní hladinu až po metody sofistikovanější sestávající z detekčního přístroje, schopné zjistit úniky nepatrných rozměrů v řádu 10^{-10} mbar.l/s. Druhá kapitola je věnována samotnému měření těsnosti dle 3 zvolených metod. Jednalo se o metody měření uniklého průtoku, metodu poklesu tlaku a metodu nárůstu tlaku v uzavřeném objemu. Na druhou kapitolu poté navazuje kapitola 3, ve které se nachází specifikace prvků, ze kterých byly sestaveny testovací obvody k měření těsnosti. Čtvrtá kapitola je věnována matematickému modelování těchto pneumatických obvodů pomocí software Matlab Simulink. Z pneumatické knihovny Simscape byly matematické modely složeny z dostupných bloků a poté nastaveny na hodnoty měření. Při modelování v programu Matlab Simulink jsem narazil na problém nízkého počtu prvků v pneumatické knihovně Simscape. Neobsahovala prvky jako uzavírací ventil nebo 5/2 rozvaděč. Bylo tedy nutné nahrazení těchto prvků za prvky se stejným funkčním principem a jejich nastavením dle katalogových hodnot uváděných výrobcem aby bylo docíleno shody simulačních bloků s prvky měření.

Po této kapitole následuje porovnání simulovaných hodnot matematických modelů s hodnotami skutečného měření. Hodnoty simulace a měření všech metod se v průměru lišily v rozsahu od 1 do 10 %.

V poslední kapitole je popsáno porovnání všech měřených metod s výsledky simulace, všechny metody jsou následně porovnány z hlediska časové náročnosti, spolehlivosti a skladby zařízení. Všechny zmíněné měřené metody jsou schopny zjistit netěsnost do rozsahu $0,5 \text{ dm}^3/\text{min}$, u nižších hodnot průtoku se zvyšovala nepřesnost zvoleného snímače průtoku v důsledku jeho měřicího rozsahu. Při testování těsnosti metodou poklesu tlaku v uzavřeném objemu je možné zjistit, zda je prvek těsný nebo nikoliv už po několika sekundách měření, v závislosti na zvoleném snímači tlaku jeho rozsahu a přesnosti. Pokud by měl být prvek při tomto druhu testu považován za těsný, musí se tlaková difference mezi začátkem testu a jeho koncem rovnat nule. V mém případě se průměrný tlakový pokles ve vzdušníku za dobu měření pohyboval okolo hodnoty 14 %. Při takto velké netěsnosti by došlo k nenávratnému poškození světlometu. Při testování těsnosti metodou nárůstu tlaku se přírůstek tlaku od začátku do konce měření pohyboval mezi hodnotami 4-6 %. Nižší tlakový nárůst byl

způsoben nižším nastaveným tlakem a různými součiniteli výtoku zevnitř vzdušníku ven a naopak. Z hlediska časové náročnosti by proto metodě nárůstu tlaku trvalo nejdéle ze všech metod, detekování či určení velikosti netěsnosti. Z pohledku sklady zařízení bylo výhodné, že všechny 3 metody bylo možné měřit na jednom pracovním standu. Nahrazením či odebráním určitého prvku z obvodu byla za krátký časový úsek vytvořena nová měřicí metoda. Pokud bych měl doporučit jednu ze tří zkoumaných metod pro stanovení netěsnosti, pak bych zvolil metodu poklesu tlaku. Netěsnost se projeví prakticky okamžitě, nároky na měřicí techniku nejsou tak velké jako u průtokové metody a také při porovnání naměřených dat s matematickým modelem jsem dospěl k nejlepší shodě. Samozřejmě vytvořený matematický model by bylo nutno konfrontovat a verifikovat ještě s výsledky měření při různých velikostech netěsnosti.

Seznam použité literatury

- [1] *Leak detection methods* [online]. [cit. 2018-19-05]. Dostupné z: <http://cdn.thomasnet.com/ccp/20106502/32497.pdf>
- [2] *Lokalizace netěsnosti* [online]. [cit. 2018-19-05]. Dostupné z: <https://www.detekce-netesnosti.cz/lokalizace-netesnosti-zkousky-netesnosti/>
- [3] *Be spoke solutions* [online]. [cit. 2018-19-05]. Dostupné z: <https://www.detekce-http://vac-eng.com/bspoke-solutions/>
- [4] *Helium hats* [online]. [cit. 2018-19-05]. Dostupné z: <https://www.lacotech.com/c/leak-testing/products-by-leak-test-method/helium-leak-testing/helium-hats>
- [5] *New halogen leak detector* [online]. [cit. 2018-19-05]. Dostupné z: <http://oakbluffclassifieds.com/Farm-Implements/New-halogen-leak-detector-wjl-6000-gas-refrigerant.aspx>
- [6] Measurement principle of helium leak test [online]. [cit. 2018-19-05]. Dostupné z: <http://www.fukuda-jp.com/en/leak/f04/>
- [7] Hydrogen leak test [online]. [cit. 2018-19-05]. Dostupné z: <http://fukuda-id.com/hydrogen-leak-tester/>
- [8] Gas leak detection [online]. [cit. 2018-19-05]. Dostupné z: <http://www.abbeyproducts.com/gas-leak-detection/>
- [9] KOPÁČEK, Jaroslav. *Pneumatické mechanismy*. 2. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2005. ISBN 80-248-0879-X.
- [10] Kopčák Jaromír Modelování pneumatických systémů pomocí Matlab-Simulink Simscape. Ostrava, 2013. Diplomová práce (ing). VŠB - Technická univerzita Ostrava Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 12.6 2013.
- [11] Palenčár, R; Vdoleček, F; Halaj, M. Nejistoty v měření I: vyjadřování nejistot. *Automa*, 7, 2001, č 7-8, s. 50-54
- [12] Palenčár, R; Vdoleček, F; Halaj, M. Nejistoty v měření II: nejistoty přímých měření. *Automa*, 7, 2001, č 10, s. 52-56

[13] Vdoleček, F Palenčár, R; Halaj, M. Nejistoty v měření V:od teorie k praxi. *Automa*,8, 2001, č 5, s. 42-44

[14] SMC PFM750-C8-E-WR digital flow switch, IFW/PFW FLOW SWITCH. SMC Pneumatics - SMC Fittings, SMC Cylinders, SMC Valves & More [online]. [cit. 2018-19-05]. Dostupné z: <http://www.smcpneumatics.com/PFM750-C8-E-WR.html>

[15] Datasheet -- Festo Corporation -- VAD-1/8 Vacuum generator | Engineering360. Datasheet Directory [online]. [cit. 2018-19-05]. Dostupné z: <https://datasheets.globalspec.com/ds/937/Festo/EA3CEA8D-3DC1-49A7-A209FDA6F965F100>

[16] SMC EVZM550-F01-33B valve, mechanical, VM (VFM/VZM) MECHANICAL VALVE. SMC Pneumatics - SMC Fittings, SMC Cylinders [online]. [cit. 2018-19-05]. Dostupné z: <http://www.smcpneumatics.com/EVZM550-F01-33B.html>

[17] Hydrotechnik: Hydrotechnik GmbH [online]. [cit. 2018-19-05]. Dostupné z: https://www.hydrotechnik.com/fileadmin/user_upload/Technische_Datenblaetter_Techn_Info_s/Sensoren_HySense_PR_300_TEI_ENG.pdf

[18] Hydrotechnik: Hydrotechnik GmbH [online]. [cit. 2018-19-05]. Dostupné z https://www.hydrotechnik.com/fileadmin/user_upload/Manuals/Messtechnik_MultiSystem_5050_BAL_ENG.pdf

[19] Proportional pressure regulators VPPE [online]. [cit. 2018-19-05]. Dostupné z https://www.festo.com/cat/lv_lv/data/doc_engb/PDF/EN/VPPE_EN.PDF

[20] ČSN 10 9006 (109006) Pneumostatické mechanizmy. Metódy skúšok [online]. [cit. 2018-19-05]. Dostupné z http://www.technicke-normy-csn.cz/109006-csn-10-9006_4_24883.html

Poděkování

Tato práce byla podpořena v rámci projektu SGS „Modelování a experimentální ověření dynamických jevů v tekutinových a vakuových systémech“ SP2018/157.

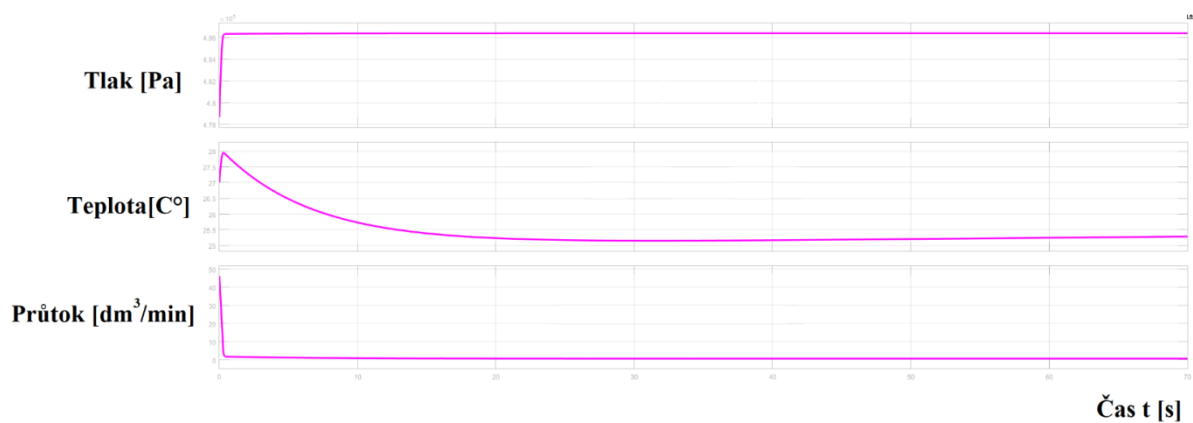
Seznam příloh

- Příloha č. 1.** Grafické vyhodnocení unikajícího průtoku Matlab pro 0,5; 0,4; 0,2; 0,1 MPa
- Příloha č. 2.** Grafické vyhodnocení poklesu tlaku Matlab pro 0,5; 0,4; 0,2; 0,1 MPa
- Příloha č. 3.** Grafické vyhodnocení nárůstu tlaku Matlab pro 0,06; 0,04; 0,02 MPa

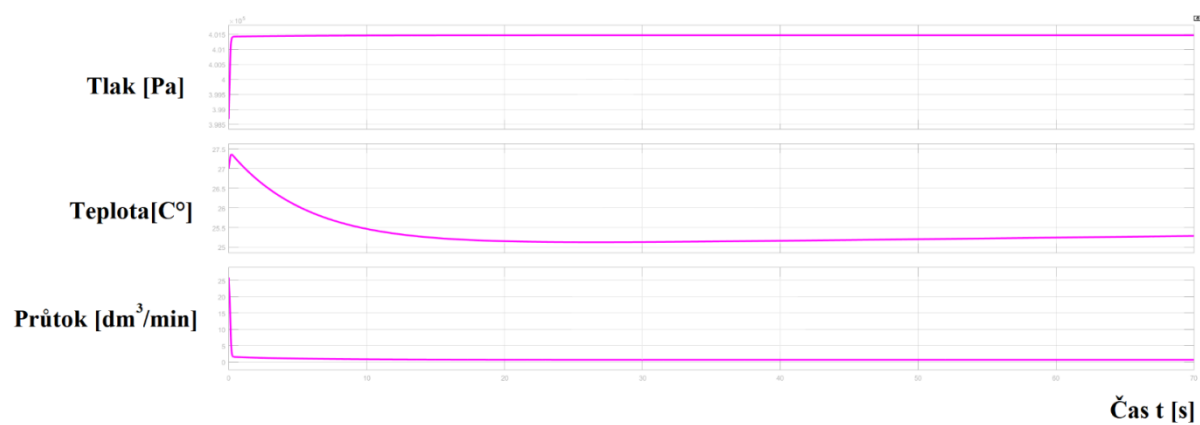
Příloha č. 1

Grafické vyhodnocení Matlab měření pro měření unikajícího průtoku pro 0,5 ; 0,4 ; 0,2 ; 0,1 MPa

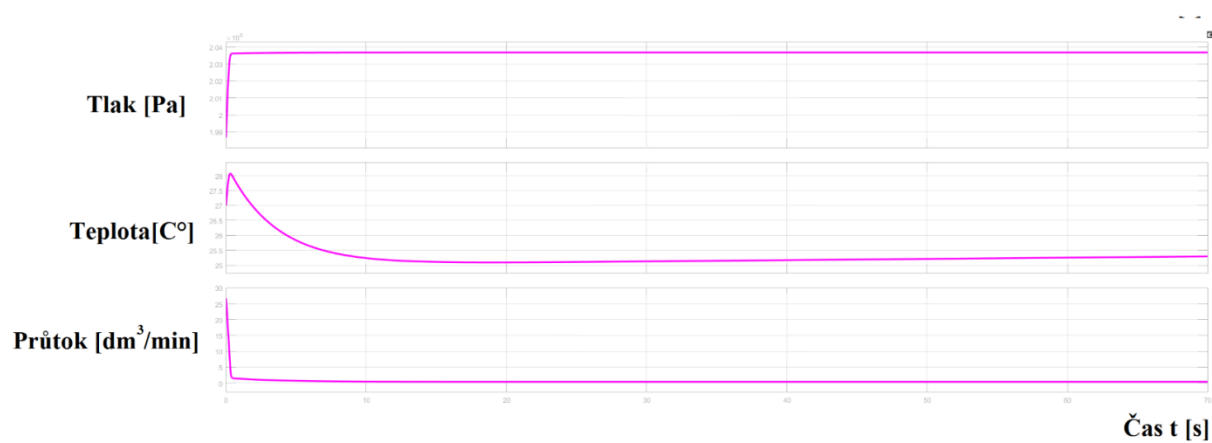
0,5 MPa

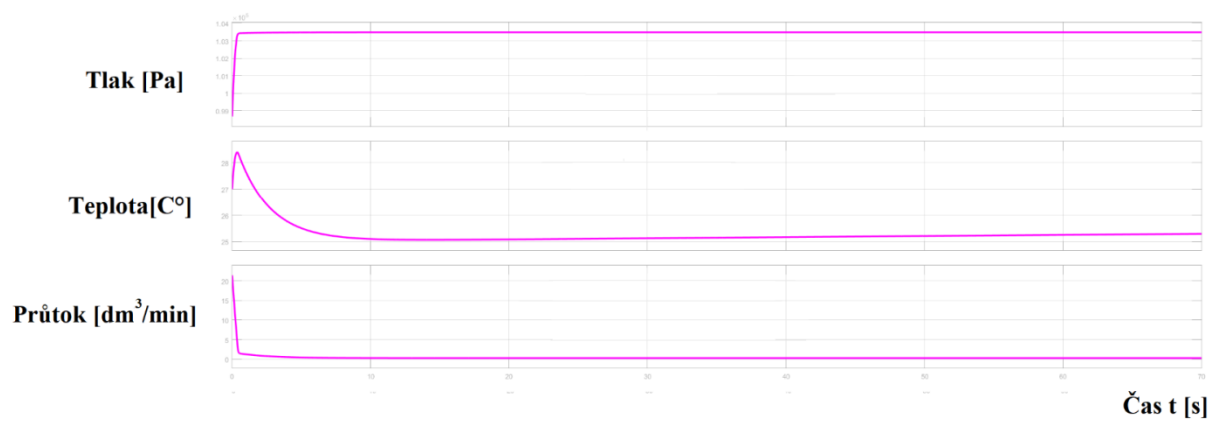


0,4 MPa



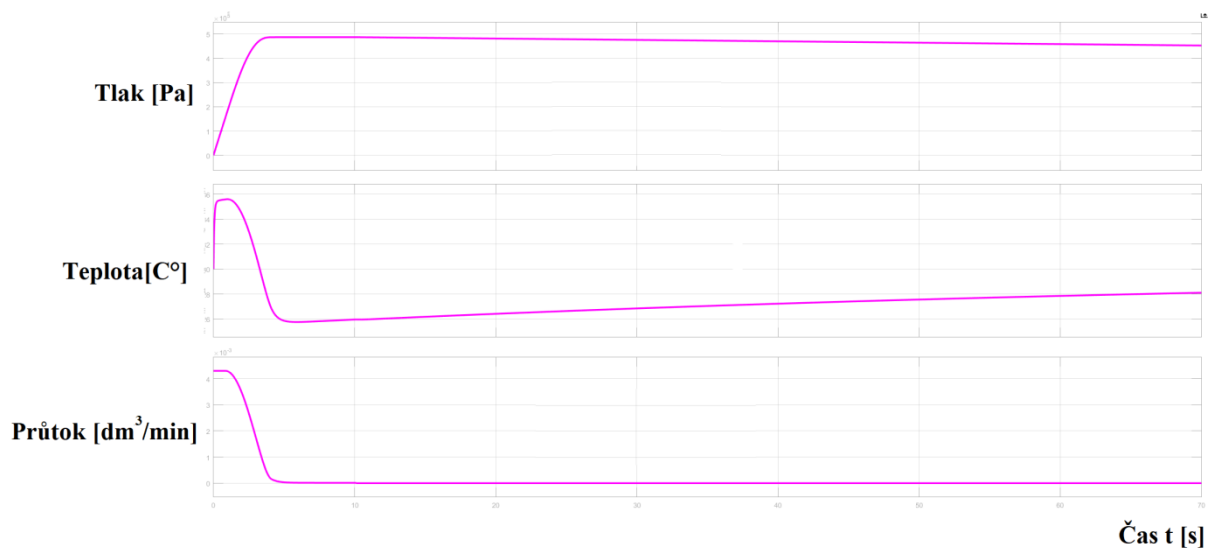
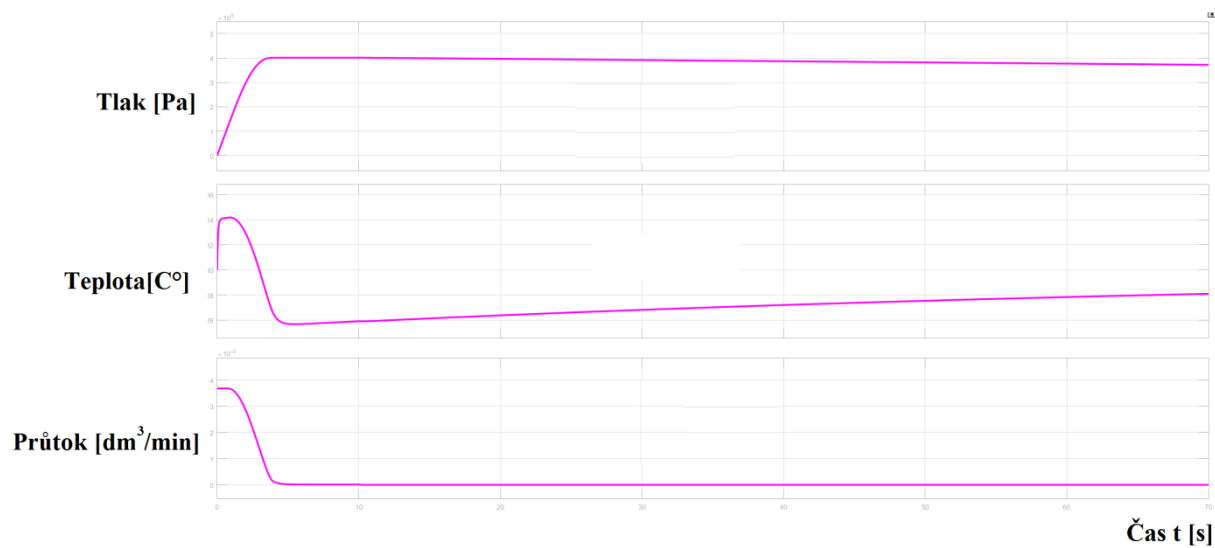
0,2 MPa

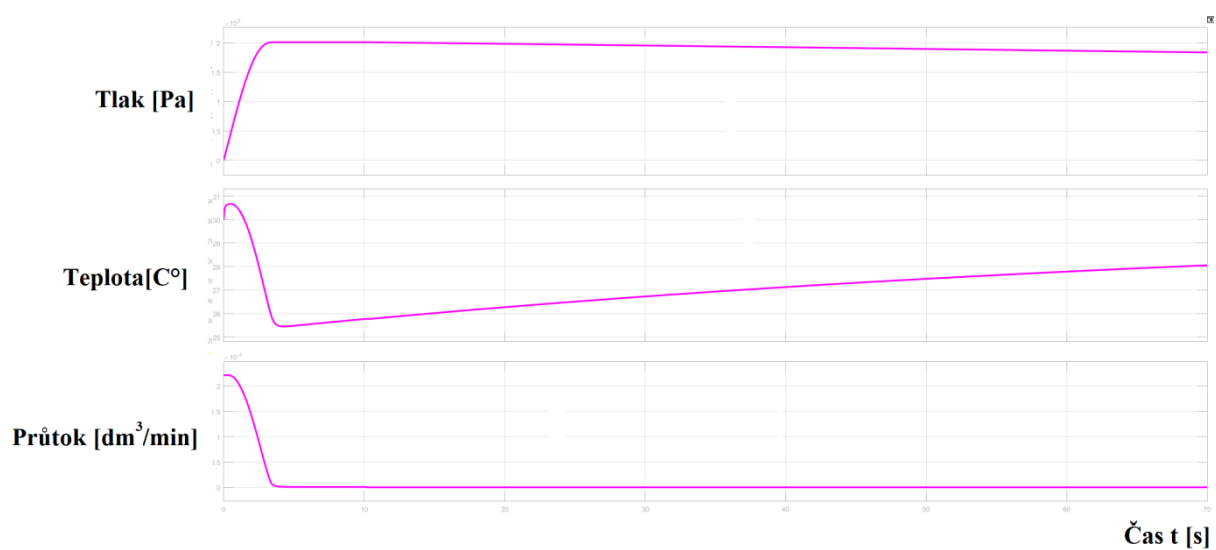
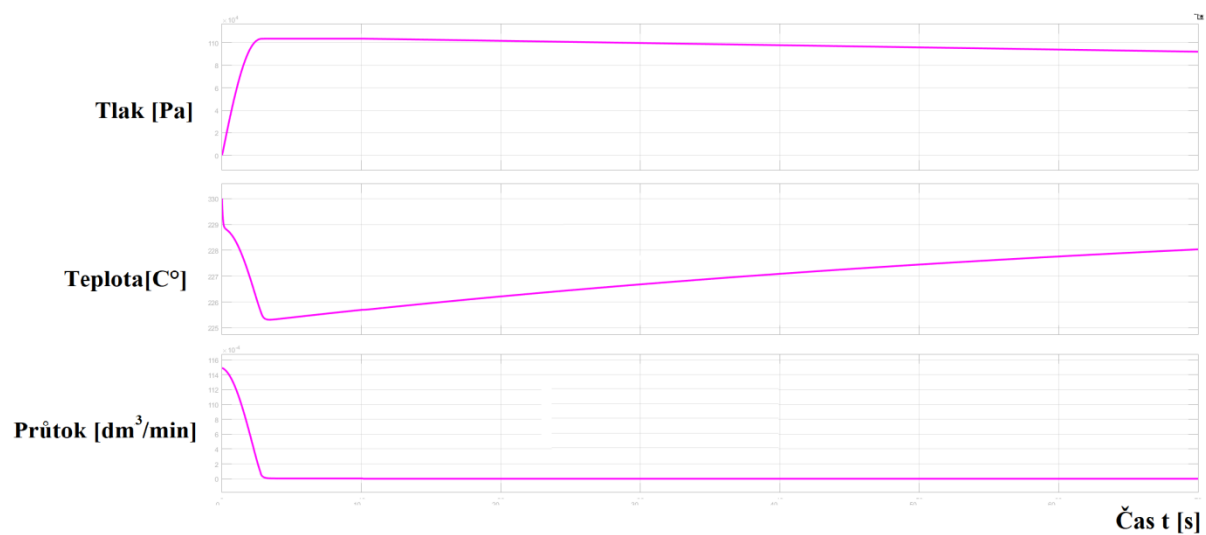


0,1 MPa

Příloha č. 2

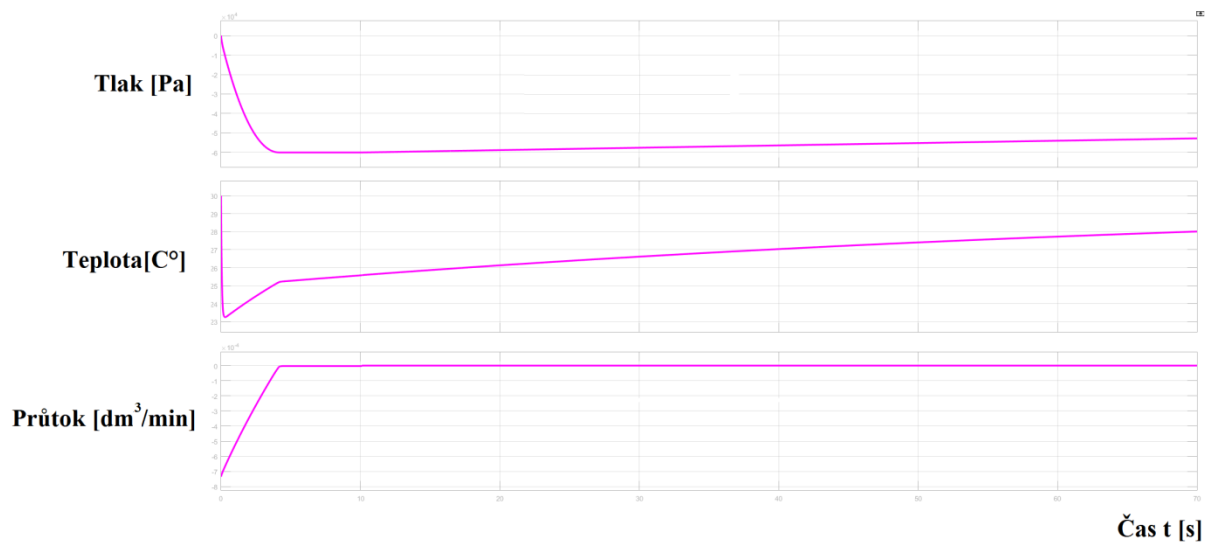
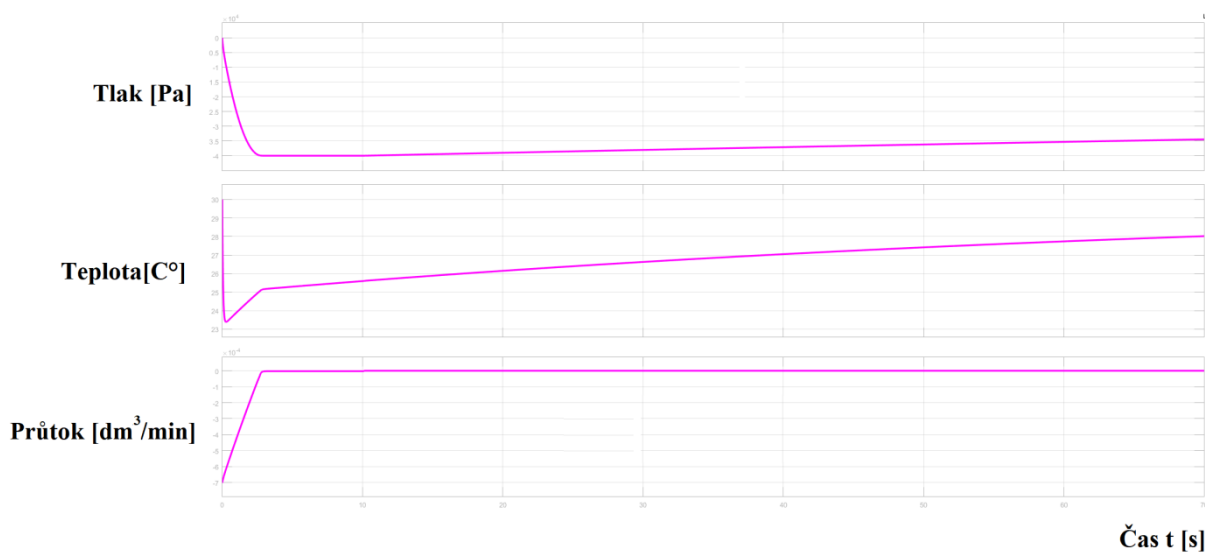
Grafické vyhodnocení Matlab měření poklesu tlaku pro 0,5 ; 0,4 ; 0,2 ; 0,1 MPa

0,5MPa**0,4 MPa**

0,2 MPa**0,1 MPa**

Příloha č. 3

Grafické vyhodnocení Matlab měření nárůstu tlaku pro 0,06 ; 0,04 ; 0,02 MPa

-0,06 MPa**-0,04 MPa**

-0,02 MPa